

PROJECTO DE REGULAÇÃO LUMINOSA

Intersecções Reguladas por Sinais Luminosos
de Comando Actuado ou Semi-Actuado

ROMEU FILIPE DE CASTRO XAVIER

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Américo Henrique Pires da Costa

JULHO DE 2008

Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miiec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

“A mais grave das faltas é não ter consciência de falta alguma.”

Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao longo de toda a minha vida e mais concretamente no meu percurso académico e realização deste trabalho senti de uma forma ou de outra alguns apoios e incentivos que me levam agora a deixar aqui o meu sincero agradecimento, nomeadamente:

Ao Prof. Dr. Américo Henrique Pires da Costa que foi o orientador desta tese e demonstrou sempre toda a sua disponibilidade para esclarecer quaisquer dúvidas ou incertezas sobre o rumo a seguir. Pela quantidade de informação e conhecimento que sempre colocou à disposição.

À Prof. Dr. Maria de Lurdes de Oliveira Simões por toda a sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho e disponibilidade do seu programa de investigação.

À empresa Soltráfego pelo profissionalismo e rapidez de resposta ao pedido de informação solicitado.

Aos meus pais por todas as condições que me proporcionaram para poder realizar este trabalho da melhor forma.

À minha irmã pela ajuda que me deu ao longo desta caminhada.

À Anita e Paulo Silva pelo apoio e presença sempre que necessitei.

À minha madrinha Helena Machado pela orientação nas decisões mais difíceis e ao meu padrinho Francisco Vieira pela influência no rumo que segui, continuas comigo, não te esquecerei.

A todos os meus amigos que tiveram sempre uma palavra de ânimo e me ajudaram a ultrapassar dificuldades.

RESUMO

O presente relatório é o resultado do trabalho realizado no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil na especialização de Vias de Comunicação e teve como principal objectivo fazer uma análise crítica à regulação luminosa actuada ou semi-actuada aplicada em intersecções e consequente classificação de níveis de serviço.

Para tal explorou-se a relação entre uma solução de cálculo de planos de regulação a tempos fixos como valores base para utilização em software de simulação de comportamento do tráfego em solução semi-actuada.

A estratégia adoptada foi a da realização de um estudo de tráfego a um entroncamento composto por três vias no troço principal (não actuado) e por duas vias no troço secundário (actuado).

Esta foi a amostra de base sobre a qual se realizaram diversas simulações. Numa primeira fase composta por recolha de dados de tráfego e geometria do entroncamento para obtenção de três parâmetros (débito, débito de saturação e tempo de limpeza) e posteriormente através das combinações possíveis entre eles incluindo mais três parâmetros (índice de carga, ciclo óptimo e tempos de verde) sempre tendo como principal objectivo as variações implicadas no atraso médio.

Finalmente, e face aos resultados obtidos ao longo do estudo, procurou fazer-se uma análise apreciativa dos critérios de optimização de regulação luminosa utilizados no entroncamento em causa.

PALAVRAS-CHAVE: sinais luminosos, plano de regulação, débito, ciclo, indicadores de desempenho.

ABSTRACT

This report is the result of the work performed under the Integrated Master's degree in Civil Engineering in the specialization of Civil Communication Routes and its main objective was to make a critical analysis to actuated light regulation or semi-actuated applied in intersections and consistent classification of levels of service.

To that end up exploring the relationship between a solution of calculation of plans to regulate the time fixed values as basis for use in software simulation of behaviour of traffic in semi-activated solution.

The strategy was to conduct a study of traffic at a junction composed of three lanes in the main section (not actuated) and two lanes in the secondary section (actuated).

This was the sample basis on which took place several simulations. Initially composed of collection of traffic data and geometry of the intersection to obtain three parameters (speed, rate of saturation and time for cleaning) and then through the possible combinations between them including three more parameters (index of cargo and optimum cycle times of green) always with the main objective changes involved in the average delay.

Finally, given the results obtained during the study, tried to make an appreciative analysis of the criteria for optimization of regulation devices used in the junction concerned.

KEYWORDS: light signals, regulation plan, Debit, cycle, indicators of performance.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. ÂMBITO DE ESTUDO E ENQUADRAMENTO GERAL	1
--	----------

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
--	----------

1.3. ESTRUTURAÇÃO E CONTEÚDOS DO TRABALHO	2
--	----------

2. ESTADO DA ARTE

3

2.1. SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO ACTUADO OU SEMI-ACTUADO E DE TEMPOS FIXOS	3
---	----------

2.2. ENQUADRAMENTO	4
---------------------------------	----------

2.3. ESTRATÉGIAS BASE DE ACTUAÇÃO: ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES	5
---	----------

2.3.1. VARIAÇÃO EM TEMPO REAL DA DURAÇÃO DAS FASES.....	5
---	---

2.3.2. ESTRATÉGIAS DE ACTIVAÇÃO SELECTIVA DAS FASES	7
---	---

2.3.2.1. SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DA FASE SECUNDÁRIA	8
--	---

2.3.2.2. SOLUÇÃO TOTALMENTE ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES.....	9
--	---

2.3.2.3. SOLUÇÃO ACTUADA COM FASE DE ESPERA PARA PERÍODOS MORTOS	10
--	----

2.3.2.4. SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM FASE ESPECIAL PARA AS VIRAGENS À ESQUERDA	11
---	----

2.3.2.5. SOLUÇÕES COM ACTIVAÇÃO DINÂMICA DE FASES PEDONAIS	12
--	----

2.4. OUTRAS SOLUÇÕES E ESTRATÉGIAS DE ACTUAÇÃO.....	15
--	-----------

2.4.1. ESTRATÉGIAS ANTI-BLOQUEIO	15
--	----

2.4.2. VARIAÇÃO DINÂMICA DA PRIORIDADE DE CADA CORRENTE DE TRÁFEGO	17
--	----

2.4.3. SOLUÇÕES ESPECIAIS DE APOIO AO PEÃO E MINIMIZAÇÃO DE DEMORAS DOS VEÍCULOS.....	17
---	----

2.4.4. ESTRATÉGIAS DE ATRIBUIÇÃO DE PRIORIDADE A VEÍCULOS ESPECIAIS.....	18
--	----

2.4.5. ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS DO CONGESTIONAMENTO NA REDE.....	19
2.4.6. ESTRATÉGIAS DE RECURSO	19
3. ESTUDO DE UMA INTERSECÇÃO	20
3.1. INTERSECÇÃO A REGULAR	20
3.1.1. BASE DE DADOS	21
3.1.1. PLANO DE REGULAÇÃO	23
3.2. DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO E TEÓRICO	25
3.2.1. DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO	25
3.2.2. DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO	26
3.3. CONSIDERAÇÕES A DESTACAR	30
3.3.1. CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO.....	30
3.3.2. CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO	34
3.3.3. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	36
3.3.4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	38
3.3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	40
3.4. SIMULAÇÃO COM SOFTWARE <i>AWESIM</i>	41
3.4.1. ESTRUTURA DAS SIMULAÇÕES EFECTUADAS.....	45
3.4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO	48
3.4.3. COMPARAÇÃO COM TEMPOS E ATRASOS EM VIGOR NA INTERSECÇÃO ANALISADA.....	51
3.4.4. DIAGRAMA DE TEMPOS ÓPTIMOS.....	52
3.4.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	53
3.5. EQUIPAMENTOS.....	54
3.5.1. SEMÁFOROS.....	54
3.5.2. SENSORES	56
3.5.3. CONTROLADOR.....	58
3.5.4. LOCALIZAÇÃO NO TERRENO.....	59

3.6. ESTIMATIVA ORÇAMENTAL	60
3.6.1. ESQUEMA ILUSTRATIVO.....	60
3.6.2. ORÇAMENTO	61
4. CONCLUSÕES.....	62
4.1. APRECIÇÃO DO ESTUDO DESENVOLVIDO	62
4.2. PERSPECTIVAS DE FUTURO SOBRE O TEMA.....	63
 BIBLIOGRAFIA	 64
 ANEXOS.....	 67

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA EXTENSÃO DO TEMPO DE VERDE	6
FIGURA 2.2 – EXEMPLOS DE PROCESSOS DE FIXAÇÃO DINÂMICA DA DURAÇÃO DAS FASES.....	6
FIGURA 2.3 – SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DA FASE SECUNDÁRIA	9
FIGURA 2.4 – SOLUÇÃO TOTALMENTE ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES	10
FIGURA 2.5 – SOLUÇÃO ACTUADA COM FASE DE ESPERA PARA PERÍODOS MORTOS.....	11
FIGURA 2.6 – SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM FASE ESPECIAL PARA AS VIRAGENS À ESQUERDA	12
FIGURA 2.7 – SOLUÇÕES COM ACTIVAÇÃO DINÂMICA DE FASE PEDONAL EXCLUSIVA	13
FIGURA 2.8 – SOLUÇÕES COM ACTIVAÇÃO DINÂMICA DE FASE PEDONAL EXCLUSIVA	14
FIGURA 2.9 – EXEMPLO DE USO DE DETECTOR DE CAUDA EM VIAS SEGREGADAS DE VIRAGEM À ESQUERDA	15
FIGURA 2.10 – EXEMPLO DE USO DE DETECTOR DE CAUDA EM ACESSOS CONGESTIONADOS	16
FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA INTERSECÇÃO A REGULAR.....	20
FIGURA 3.2 – DADOS INICIAIS DE VOLUMES DE TRÁFEGO DA RUA DOMINGUES MACHADO	21
FIGURA 3.3 – DADOS INICIAIS DE VOLUMES DE TRÁFEGO DA RUA PEDRO HISPANO	22
FIGURA 3.4 – PLANO DE REGULAÇÃO – FASE A.....	23
FIGURA 3.5 – PLANO DE REGULAÇÃO – FASE B.....	24
FIGURA 3.6 – VIA 1, FASE A – OBSTRUÇÃO DA VIA	33
FIGURA 3.7 – INTERFACE PROGRAMA AWESIM	42
FIGURA 3.8 – INTRODUÇÃO DE PARÂMETROS	43
FIGURA 3.9 – SIMULAÇÃO.....	43
FIGURA 3.10 – RESULTADOS.....	44
FIGURA 3.11 – GRÁFICO DE VALORES DA TABELA 3.8 QUE INCORPORA OS PARÂMETROS ÓPTIMOS PARA O ATRASO MÉDIO GLOBAL	48
FIGURA 3.12 – GRÁFICO DE VALORES DA TABELA 3.8 QUE INCORPORA OS PARÂMETROS ÓPTIMOS PARA O ATRASO DAS VIAS ACTUADAS	49
FIGURA 3.13 – GRÁFICO VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO VIAS NÃO ACTUADAS	50

FIGURA 3.14 – DIAGRAMA DE TEMPOS ÓPTIMOS	52
FIGURA 3.15 – DIMENSÕES DE UM SEMÁFORO TIPO.....	54
FIGURA 3.16 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UM SEMÁFORO ACTUAL	55
FIGURA 3.17 – ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DAS ESPIRAS MAGNÉTICAS.....	56
FIGURA 3.18 – ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE UM DETECTOR MICRO- ONDAS	57
FIGURA 3.19 – ILUSTRAÇÃO DE UM CONTROLADOR E RESPECTIVO PAINEL DE CONTROLO	59
FIGURA 3.20 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA LOCALIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NO TERRENO	59
FIGURA 3.21 – ESQUEMA REPRESENTATIVO PARA BASE ORÇAMENTAL.....	60

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 – EXEMPLO DE MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO	25
TABELA 3.2 – MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 1	31
TABELA 3.3 – MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 2	32
TABELA 3.4 – ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA1	34
TABELA 3.5 – ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA2.....	35
TABELA 3.6 – INDICADORES DE DESEMPENHO E TEMPOS DE VERDE TEÓRICOS.....	38
TABELA 3.7 – INDICADORES DE DESEMPENHO E TEMPOS DE VERDE PRÁTICOS.....	39
TABELA 3.8 – VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO MÉDIO E ATRASO DAS VIAS ACTUADAS (9,34 S E 15,88 S)	46
TABELA 3.9 – VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO DAS VIAS NÃO ACTUADAS (4,84 S)	47
TABELA 3.10 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS E VALORES APLICADOS NA INTERSECÇÃO	51
TABELA 3.11 – ESTIMATIVA ORÇAMENTAL	61

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

q - débito de chegadas

q_v - débito de chegadas por via

s - débito de saturação

y_{ci} - (índice de) carga da corrente de tráfego i

y_i - (índice de) carga da fase i

Y - (índice de) carga do cruzamento

ρ - raio da curva

I - declive

d_T - dist. entre a barra de paragem do movimento que termina e ponto crítico

d_I - dist. entre a barra de paragem do movimento que inicia e ponto crítico

w - largura da via

f_w - f. ajust. largura da via

f_i - f. ajust. Declive

f_z - f. ajust. Localização

f_p - f. ajust. posição da via

f_t - f. ajust. composição do tráfego

f_d - f. ajust. mudança de direcção

E - coeficiente de equivalência

Q - capacidade

Q_r - capacidade de reserva

Y_{max} - índice carga máx. Cruzamento

x - grau de saturação

d - atraso por veículo

t_r - tempo de reacção

d_p - distância de paragem

d_v - comprimento do veículo

d_j - espaçamento médio de veículos em fila

v – velocidade

v_T - veloc. do veículo/peão que inicia o mov.

v_I - veloc. do veículo / peão que termina o movimento

C - duração do ciclo

C_o - duração do ciclo ótimo

C_{min} - duração do ciclo mínimo

C_{max} - duração do ciclo máximo

g - tempo de verde útil

G - tempo de verde real

A - tempo de amarelo

t_{pa} - tempo perdido no arranque

t_{ap} - tempo adicional de passagem

l - tempo perdido por fase

I - tempo de interverde

L - tempo perdido do ciclo

r - tempo de vermelho integral

t_{ij} - tempo de percurso entre i e j

1

INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO DE ESTUDO E ENQUADRAMENTO GERAL

Os semáforos modernos foram desenvolvidos a partir de equipamentos manuais de operação de tráfego utilizados em Londres no ano de 1868. Em 1913, James Hoge inventou o primeiro semáforo eléctrico como hoje é conhecido (aplicado em Cleveland em 1914). Esta invenção aparece como sendo a origem do semáforo a três cores, o qual se propagou nos Estados Unidos no começo da década de 20. Semáforos interligados começaram a ser utilizados na cidade de Salt Lake City em 1917. Um sistema progressivo foi proposto em 1922. Os primeiros semáforos actuados foram instalados em New Haven, East Norwalk e Baltimore em 1928. A evolução dos equipamentos de controle semaforico permitiu maior flexibilidade da filosofia de controlo, gerando a possibilidade de desenvolver estratégias mais sofisticadas, que procuraram maior eficiência na administração do tráfego (de forma geral, através da maior sensibilidade às variações das condições de operação).

A gestão de trânsito é um complexo problema dos domínios das aplicações distribuídas, do ponto de vista de análise e sua resolução.

O controlo actuado pelo tráfego veicular é aquele no qual o tempo de verde de uma aproximação é influenciado pela detecção imediata de veículos, onde cada aproximação está sujeita aos tempos mínimo e máximo de verde e algumas fases podem ser ignorados, se não houver procura no seu detector. A actuação pode ser total (em todas as correntes de tráfego) ou parcial (como na semi-actuação, em que apenas as correntes secundárias são actuadas). Das estratégias de resposta às condições de tráfego, deve ser diferenciado o controlo dos semáforos por actuação do controlo adaptativo como lógica descentralizada alternativa.

O controlo adaptativo é aquele no qual um esquema de horizonte móvel é utilizado para prever as condições de tráfego existentes e calcular o plano semaforico. Em contrapartida, no controlo actuado total, essas intensidades dos fluxos de tráfego são absorvidas pelas variações dos períodos de verde em cada instante, de acordo com os eventos detectados. Os sinais de tráfego são usados para controlar a procura de veículos ou peões a locais onde existem potenciais conflitos ou onde, devido à existência de dispositivos em excesso (marcas ou sinais) não providenciam um controlo de tráfego adequado.

Os sinais luminosos exercem uma profunda influência na fluência do tráfego e podem operar para vantagem ou desvantagem dos movimentos dos veículos ou peões que eles controlam. Consequentemente, uma aplicação adequada, tipo, instalação, operação e manutenção dos sinais luminosos são cruciais à movimentação correcta do tráfego em localizações específicas e pode aumentar a capacidade de fluxo da intersecção. Contrariamente, aplicação injustificada, tipo incorrecto, modo de operação impróprio, ou manutenção inadequada dos sinais luminosos pode causar atrasos excessivos e desnecessários e reduzir a capacidade da intersecção.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Este trabalho é sobretudo de natureza numérica baseado num conjunto de simulações. O principal objectivo é a avaliação do impacto que as alterações nas características dos elementos de um entroncamento ou cruzamento possam ter em termos de desempenho do fluxo de tráfego. Ou seja, no seguimento do que foi exposto no ponto 1.1 acerca das formas de regulação de tráfego, será feita uma análise com vista a determinar de que forma alguns parâmetros da regulação luminosa podem ter influência no atraso global que o cruzamento poderá ter.

Neste caso, o estudo será limitado aos parâmetros mais significativos das vias actuadas (extensão do tempo de verde, distância do detector, tempo de verde inicial, tempo de verde máximo) e das vias não actuadas (tempo de verde mínimo).

Partindo de valores de referência para cada um desses parâmetros efectuar-se-ão diversas simulações para valores extremos, mas sempre dentro de limites realistas e aceitáveis.

1.3. ESTRUTURAÇÃO E CONTEÚDOS DO TRABALHO

Depois deste primeiro capítulo introdutório em que se faz um breve enquadramento e uma abordagem superficial do tema em estudo, no capítulo 2 (Estado da Arte) procura-se fazer uma exposição dos diversos casos de regulação luminosa, de como são implementados e de como funcionam. De seguida, e de forma a servir de orientação para o estudo de tráfego, faz-se uma apresentação sobre o conteúdo e método de cálculo da base deste trabalho, a semi-actuação.

O capítulo 3 representa o resultado prático do tema deste trabalho. Inicialmente é apresentada a base de dados sobre a qual incide o estudo de tráfego. É feita a caracterização da amostra, realçando quais as suas particularidades e quais os critérios e considerações tomadas. São também definidas as condições de referência que servirão de base para o restante trabalho.

De seguida são apresentados os resultados das diferentes simulações efectuadas e a análise dos mesmos. Os cálculos são divididos em duas fases consoante o tipo de abordagem tomada. Numa primeira fase com parâmetros a variar isoladamente e depois na segunda fase uma combinação entre eles. No final do capítulo é feita uma análise desempenho do cruzamento.

Em jeito de conclusões, no capítulo 4, é feita uma reflexão sobre o estudo desenvolvido e são apresentadas algumas perspectivas de futuro sobre o tema.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO ACTUADO OU SEMI-ACTUADO E DE TEMPOS FIXOS

O desenvolvimento natural de métodos de controlo de tráfego vai de operações manuais a sinais automáticos de tempos fixos., onde períodos de “stop” e de “arranque” eram pré-determinados e actuavam sucessivamente. Estes sinais ajudavam em condições de tráfego fáceis mas não eram eficientes em intersecções onde o volume de tráfego variava consideravelmente.

Controladores programáveis foram introduzidos mais tarde para alterar a duração dos períodos de “stop” e de “arranque” de forma a conseguir uma adaptação com planos ou cartas de tráfego pré-definidas. Algumas ruas com um número elevado de intersecções foram mais tarde equipadas com sinais de tempos fixos em cada intersecção ao longo da rua, e os sinais foram interligados entre si de tal forma que o verde parecia progredir ao longo da rua, permitindo que grupos de veículos mais ou menos de forma contínua se deslocassem a uma determinada velocidade ao longo da série de intersecções. Desta forma houve um melhoramento onde uma série de intersecções podiam ser interligadas, mas em intersecções isoladas, o tráfego continuava a receber atrasos desnecessários, desta forma a inflexibilidade dos tempos fixos e a falta de conhecimento de formas que originassem um mínimo de atraso, o fluxo de tráfego continuava comprometido.

No início dos anos 30 uma primeira tentativa de controlo veicular de sinais foi feita nos Estados Unidos da América através da colocação de microfones lateralmente à rua e pedindo aos condutores que buzinassem. Houve muitas objecções a esta tentativa, e foi então que um método usando contacto eléctrico foi tentado. Este método “sobreviveu” numa questão de princípio até aos dias de hoje. Eram colocados tubos pneumáticos por onde circulava ar quando um veículo passava e então activava contactos eléctricos situados num compartimento selado lateralmente à rua. Outros tipos de detectores são usados actualmente, tais como detectores indutivos, radares, detectores magnéticos e de ultra-sons.

Os primeiros sinais actuados foram instalados na Inglaterra em 1932 numa junção em Londres. Infelizmente a história repetiu-se e quando foram ligados ocorreu uma explosão devido ao gás que se encontrava dentro da cabine controladora. Apesar deste incidente os sinais luminosos de comando actuado foram brevemente estabelecidos e três anos mais tarde surgiu o primeiro sistema interligado totalmente actuado, em Londres e Glasgow.

2.2. ENQUADRAMENTO

Este tipo de soluções permite a resposta em tempo real quer às alterações aleatórias e cíclicas da procura do tráfego rodoviário ou pedonal, quer, em certa medida, relativamente às alterações sistemáticas que ocorrem ao longo dos anos de vida útil das soluções, quer ainda às necessidades especiais de determinados utentes ou situações.

De facto, a existência de sistemas mais ou menos sofisticados de detecção e classificação da procura de tráfego permite o desenvolvimento de um conjunto bastante alargado de diferentes estratégias de regulação dos sinais luminosos, desde as mais simples às mais complexas, capazes de dar resposta a diferentes objectivos.

De entre estas justifica-se o destaque das seguintes:

- Variação em tempo real da duração das fases dependendo do nível momentâneo da procura;
- Decisão em tempo real sobre a relevância de chamada de determinada fase ou sequência de fases;
- Aplicação de estratégias anti-bloqueio no próprio cruzamento, em cruzamentos adjacentes ou ao nível da rede, através do controlo dos fluxos e da detecção de incidentes;
- Variação dinâmica da prioridade relativa atribuída a cada corrente de tráfego rodoviário ou pedonal em função da sua importância relativa em cada momento;
- Defesa da segurança e minimização das demoras dos peões, bem como minimização das demoras impostas aos veículos através de uma monitorização mais apertada dos movimentos dos peões;
- Controlo das velocidades dos veículos a partir da sua monitorização em tempo real;
- Atribuição de prioridade de acesso a veículos de emergência ou de transportes colectivos a partir da sua identificação em tempo real.
- Estratégias de minimização dos impactos do congestionamento através do controlo de fluxos
- Estratégias de recurso para resposta a situações de funcionamento deficiente dos sistemas de recolha de informação em tempo real

Estas estratégias podem ser aplicadas de forma isolada ou integrada resultando em planos de regulação com actuação que poderão ser do tipo “semi-actuado” ou “completamente actuado” dependendo da existência de informação em tempo real obtida através de sensores, que podem ser de diferentes tipos, sobre apenas algumas ou todas as correntes de tráfego motorizadas e pedonais servidas pelo cruzamento. Podem também ser aplicadas na regulação optimizada de cruzamentos isolados ou então na implementação de soluções de gestão integrada de redes onde uma percentagem significativa dos cruzamentos é regulada por sinais luminosos.

Note-se que as potencialidades acima referidas das soluções actuadas fazem com que estas apresentem muitas vantagens face a soluções mais tradicionais a tempos fixos justificando presentemente, face ao acréscimo de custos relativamente reduzido que actualmente lhes estão associadas, a sua utilização na

generalidade das situações. De facto ao nível, por exemplo, das demoras impostas aos veículos as soluções actuadas são genericamente muito mais eficientes, particularmente nos períodos de menor procura.

Também as potencialidades de tratamento diferenciado e com decisão em tempo real relativamente a situações ou utentes especiais são importantíssimas e muito difíceis ou impossíveis de replicar com soluções a tempos fixos.

No entanto, é necessário ter a noção de que, ao nível da capacidade global para fazer face a picos e tipologias de procura conhecidos, não existem diferenças significativas face às soluções a tempos fixos porque a própria lógica de actuação leva a que se chegue quase sempre aos tempos máximos pré-definidos.

2.3. ESTRATÉGIAS BASE DE ACTUAÇÃO: ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES

2.3.1. VARIAÇÃO EM TEMPO REAL DA DURAÇÃO DAS FASES

A implementação de uma estratégia de variação em tempo real de uma qualquer fase de um plano de regulação passa pela utilização de pelo menos um sensor capaz de, num determinado ponto do trajecto de aproximação ao cruzamento, detectar a passagem de veículos pertencentes a uma ou mais das correntes de tráfego servidas nessa fase.

A partir da quantificação feita dos níveis e características da procura assim obtidos é então definida em tempo real a duração da fase em cada ciclo.

A lógica de variação da duração da fase em função do nível da procura passa pela definição de um tempo mínimo (t_{min}), de um tempo máximo (t_{max}) e de uma lógica e intervalo de extensão (ext).

O tempo mínimo, que é normalmente da ordem dos 8-10 segundos, destina-se em primeira análise a minimizar os impactos negativos decorrentes de situações de instabilidade que ocorrem no arranque das correntes de tráfego, mas pode também estar dependente da localização do relevante sensor relativamente à linha de paragem.

O tempo máximo, representa a duração máxima possível para a fase no âmbito do plano de regulação, e é definido em função dos máximos níveis de tráfego expectáveis no cruzamento durante os relevantes períodos de ponta a partir de um dimensionamento de um plano de tempos fixos. Este parâmetro destina-se a garantir que durante os períodos mais sobrecarregados não se verificam situações de extensão excessiva da duração da fase o que tenderia a provocar congestionamento em correntes de tráfego servidas noutras fases.

A decisão em cada ciclo relativamente à duração da fase, entre os valores mínimo e máximo já referidos, baseia-se (ver esquemas exemplificativos na Figura 2.2) na identificação dos períodos de quebra de continuidade dos pelotões das correntes de tráfego, indicadores de quebras significativas dos débitos de chegada ao cruzamento.

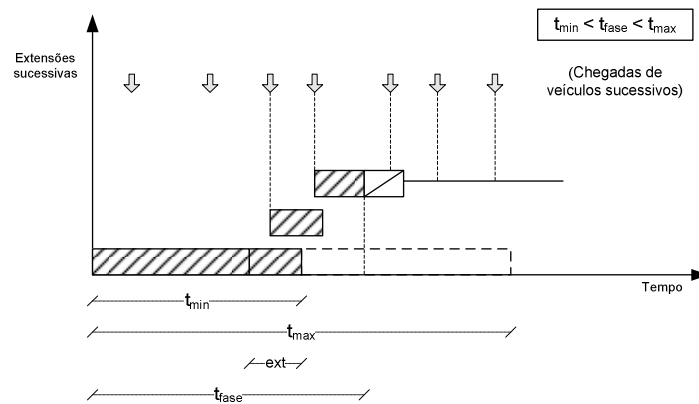


Figura 2.1 – Esquema representativo da extensão do tempo de verde

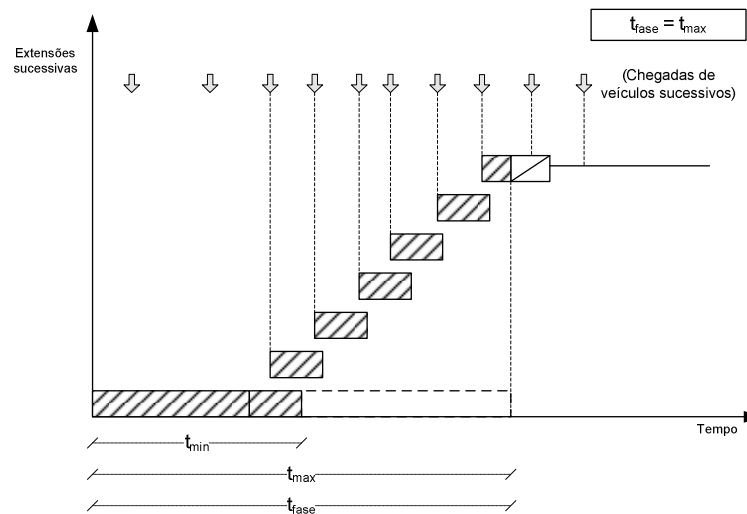


FIGURA 2.2 – EXEMPLOS DE PROCESSOS DE FIXAÇÃO DINÂMICA DA DURAÇÃO DAS FASES

Para tal define-se um valor de referência, o “intervalo de extensão”, para os intervalos de tempo entre veículos sucessivos que depende, não apenas da composição da corrente de tráfego, mas também das características geométricas dos acessos, particularmente do declive, tendendo a tomar um valor da ordem dos 2-5 segundos (frequentemente 3).

Este valor de referência, a partir do momento ($t_{min} - ext$) da fase, será depois comparado com os intervalos de tempo entre veículos sucessivamente registados pelo sensor de passagem, ocorrendo o término da fase quando se verificar um que o exceda. Se tal não acontecer até se atingir o (t_{max}), a fase será fechada quando este tempo for atingido.

Note-se que a implementação deste tipo de estratégia de actuação leva a que, durante os períodos de ponta, os cruzamentos actuados tendam a funcionar como “simples” cruzamentos a tempos fixos.

A opção por uma solução com apenas um sensor ou, mais comumente, um conjunto de sensores já que em acessos com vias múltiplas muitas vezes se aplicam sensores independentes a cada via, apresenta como principais vantagens a sua simplicidade conceptual e menor custo. Apresenta como principal desvantagem a sua menor eficiência na minimização das demoras dos veículos já que a

lógica de extensão aplicável apenas permite confirmar a inexistência de procura e consequente necessidade de fecho da fase alguns segundos, o correspondente a (*ext*), depois desta se verificar, tendendo assim a, fora dos períodos de ponta, existir sempre um atraso na reacção do sistema relativamente às condições da procura.

Esta situação pode ser minimizada através da opção de utilização de dois sensores (ou conjuntos), havendo a necessidade de colocar o sensor mais a montante do cruzamento a uma distância aproximada mas menor da que é percorrida por um veículo durante o período (*ext*).

Deste modo ficará praticamente garantido que quando neste sensor se verifique a existência de um intervalo entre veículos superior a (*ext*) e, portanto, se active o procedimento de fecho da fase, o último veículo a passar sobre o sensor já atingiu a linha de paragem tendo entrado no cruzamento.

Ao mesmo tempo haverá que garantir que a duração do tempo mínimo (t_{min}) é suficientemente alargada para que todos os veículos parados à frente deste sensor possam iniciar a marcha antes que se inicie o procedimento de verificação da necessidade de extensão de verde, de modo a garantir que, se a procura o justificar, os subseqüentes veículos podem dar início a este procedimento.

Finalmente pretende-se que o valor do (t_{min}) não seja muito significativo para evitar retirar flexibilidade por demasiada extensão da duração mínima do plano de regulação.

Da conjugação destes três requisitos resulta normalmente a adopção de uma localização a cerca de 30-40 metros da linha de paragem com a correspondente adopção de um t_{min} da ordem dos 10 a 14 segundos. O estudo que se segue aponta para valores diferentes dos apresentados, tais como uma localização do detector a 3 metros da linha de paragem com um t_{min} na ordem dos 8 a 10 segundos.

2.3.2. ESTRATÉGIAS DE ACTIVAÇÃO SELECTIVA DAS FASES

Esta estratégia permite a substituição de uma lógica de repetição sistemática de planos de regulação com sequências de fases pré-determinadas, passando-se a uma lógica de activação selectiva de alguma(s) delas, ou mesmo de todas, apenas quando se verificar o tipo de procura que o justifique, permitindo assim optimizar a atribuição do tempo às diferentes fases e utentes.

Destacam-se aplicações em planos com fases de espera em que o sistema fica suspenso na fase principal, que serve os movimentos mais importantes, ou numa fase especial, com todos os grupos semafóricos com vermelho, até que se verifique procura para uma das restantes fases.

São também importantes as aplicações a soluções onde se verifica a existência de fases especiais com activação pontual, destinadas a servir utentes, normalmente peões, ou situações menos frequentes, normalmente de procura excepcional de um ou mais movimentos direccionais ou correntes de tráfego como por exemplo as viragens à esquerda.

Este tipo de estratégias é, no caso dos movimentos motorizados, aplicado através da utilização de sensores de presença junto à linha de paragem das correntes de tráfego servidas, que registam a existência de procura e permitem a chamada das fases especiais relevantes.

No caso das fases especiais para peões a procura é, normalmente, registada através do recurso a botoneiras accionáveis pelos utentes. Neste casos trata-se de uma situação de registos de presença com memória já que a detecção mantém a sua acção para além do momento de activação, até que a fase

seja activada ou até que exista uma informação de anulação da procura assinalada por outro sistema de detecção.

2.3.2.1. SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM ACTIVACÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DA FASE SECUNDÁRIA

A Figura 2.3 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento a duas fases onde apenas os veículos das entradas secundárias são monitorizados em tempo real.

Esta é uma das soluções mais comuns e perfeitamente adequada em cruzamentos onde as vias secundárias apresentam uma importância reduzida face ao eixo principal, sendo assim lógico que este seja claramente privilegiado, e onde não existe a necessidade de regulação específica dos atravessamentos pedonais.

A activação da fase que serve as vias secundárias está dependente da detecção de veículos nessas mesmas vias.

A fase principal permanece activa enquanto não houver activação da fase secundária e enquanto não esgote o tempo de verde mínimo da fase principal.

Poderá haver períodos significativos durante os quais o cruzamento fica suspenso na fase principal, servindo os eixos do tráfego mais importantes.

Os sensores têm como função recolher informações relativas à presença de veículos e além de activar a fase secundária define a duração da mesma através da extensão do tempo de verde.

Se houver activação em períodos mortos a duração será correspondente a t_{min} e em horas de ponta será correspondente a t_{max} .

O investimento infra-estrutural é bastante reduzido devido ao número reduzido de sensores necessários. Torna-se num processo simples de regulação que requer um estudo alargado a vários períodos do dia, procurando adoptar os valores atribuídos ao “tempo mínimo de verde da fase principal.

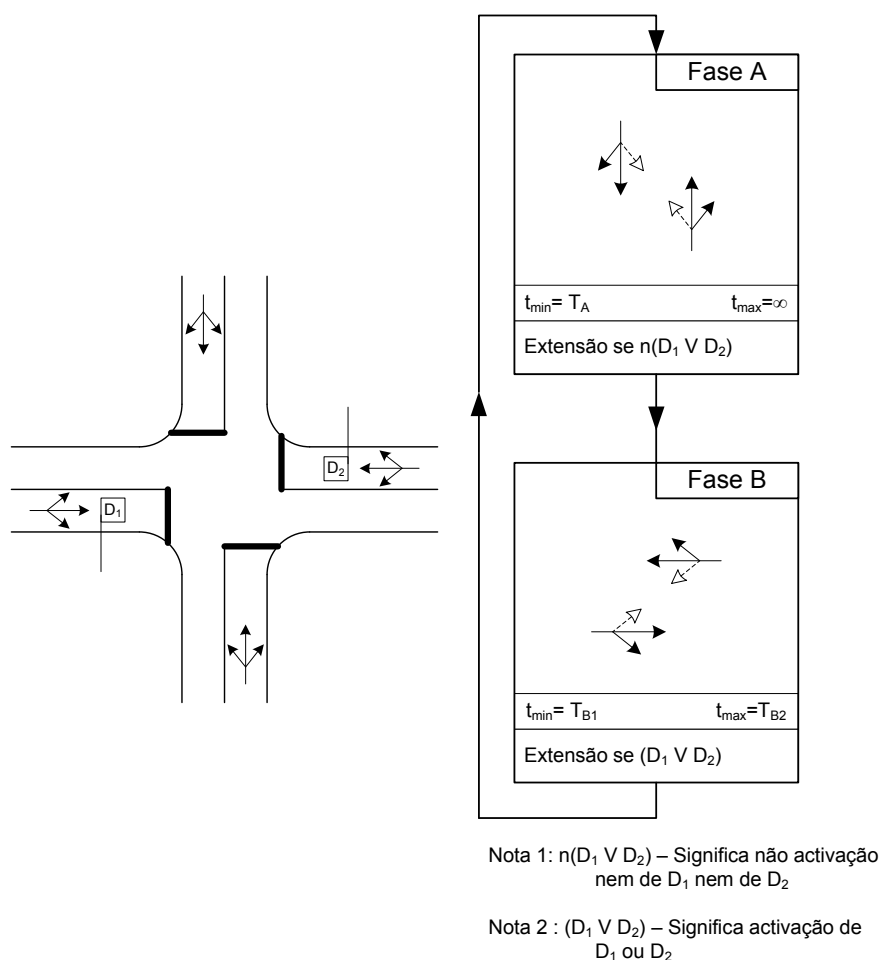


FIGURA 2.3 – SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DA FASE SECUNDÁRIA

2.3.2.2. SOLUÇÃO TOTALMENTE ACTUADA COM ACTIVAÇÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento a duas fases onde todos os veículos são monitorizados em tempo real.

A fase A1 prolonga-se caso não haja chamadas da fase B1 permanecendo activa pelo menos até t_{min} e vice-versa.

Esta é uma solução comum em cruzamentos onde a importância dos eixos que se cruzam é semelhante. No exemplo aqui apresentado assume-se que não existe a necessidade de regulação específica dos atravessamentos pedonais mas, tal como se verá adiante, esta poderá ser incorporada.

A chamada e definição da duração de cada fase dependerá da existência e tipo da procura, logo se para determinado período do dia não se registarem chegadas de veículos para uma determinada fase, o cruzamento poderá ficar suspenso numa fase, servindo as correntes de tráfego mais importantes.

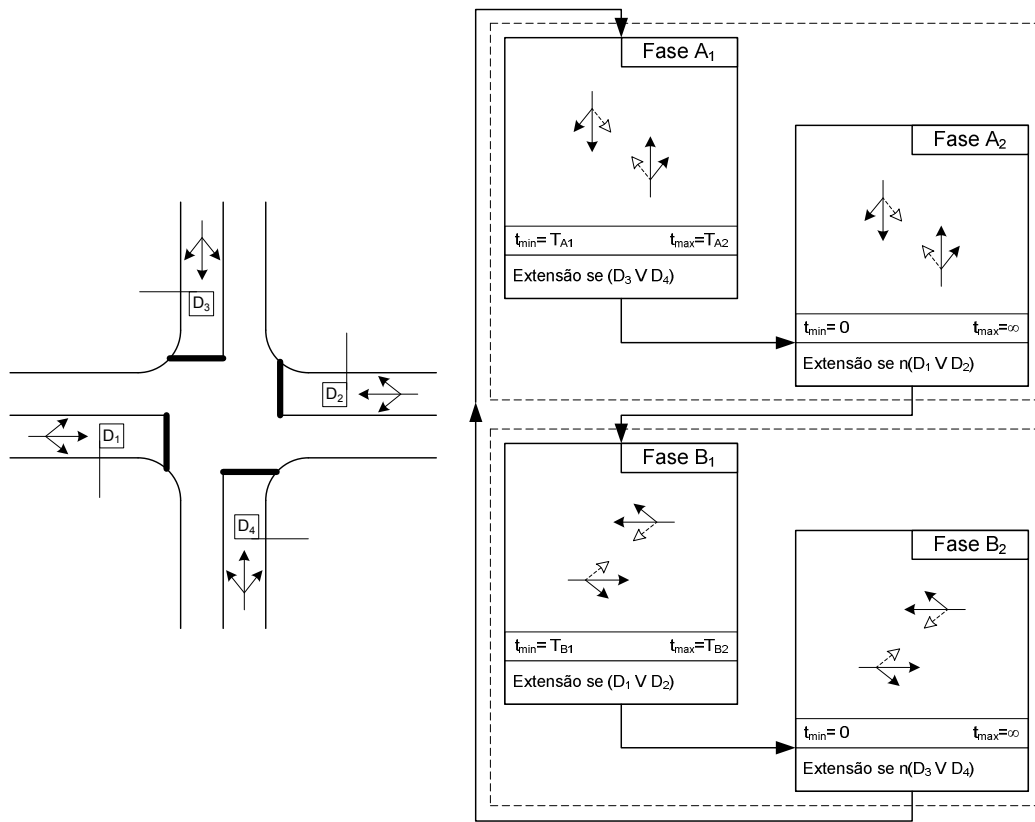


FIGURA 2.4 – SOLUÇÃO TOTALMENTE ACTUADA COM ACTIVACÃO E EXTENSÃO DINÂMICA DAS FASES

Devido ao maior número de sensores necessários torna-se uma solução mais exigente ao nível da infra-estrutura, mas para a maioria dos casos permite a definição de um único plano de regulação com capacidade de regular o cruzamento ao longo do tempo, adaptando-se eficazmente às variações cíclicas, aleatórias, mesmo sistemáticas da procura.

Esta solução tem como principal desvantagem o facto de, caso a importância relativa das correntes de tráfego se altera será necessário desenvolver diferentes sub-planos para responder a tais alterações, sob pena de, os movimentos mais sobrecarregados em cada período serem deficientemente servidos.

2.3.2.3. SOLUÇÃO ACTUADA COM FASE DE ESPERA PARA PERÍODOS MORTOS

A Figura 2.5 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento possuidor de um fase especial onde todos os movimentos recebem vermelho e que se destina a regular os períodos sem procura.

O cruzamento encontra-se em fase de “tudo vermelho” até haver alguma activação dos sensores do cruzamento podendo, caso haja activação, dar-se seguimento à respectiva fase ordinária.

É uma solução com detectores em todas as correntes de tráfego e comum em cruzamentos isolados, em que o principal objectivo é controlar as velocidades de circulação verificadas nos períodos mortos, especialmente à noite.

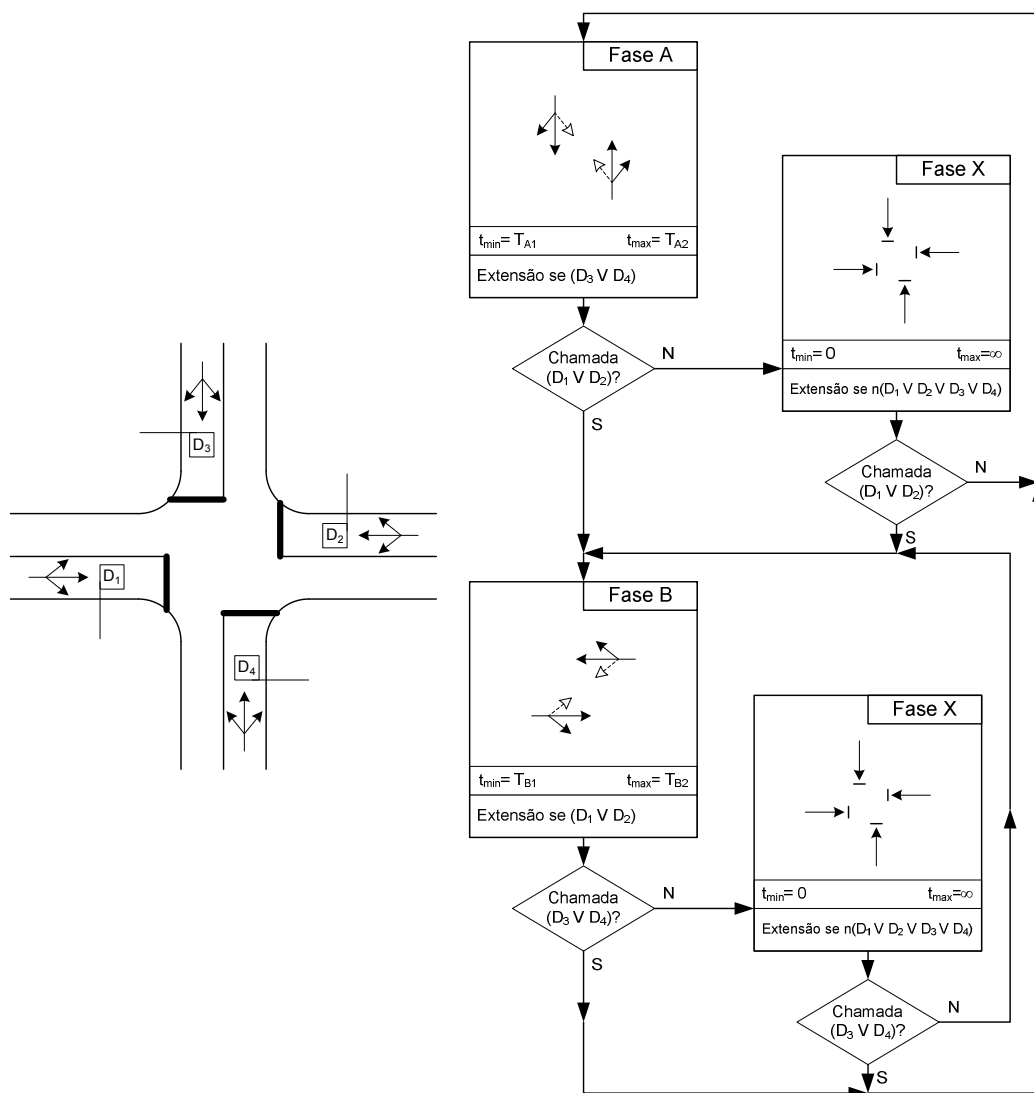


FIGURA 2.5 – SOLUÇÃO ACTUADA COM FASE DE ESPERA PARA PERÍODOS MORTOS

2.3.2.4. SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM FASE ESPECIAL PARA VIRAGENS À ESQUERDA

A Figura 2.6 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento possuidor de um fase especial, onde os movimentos de viragem à esquerda a partir do eixo principal, quando necessário, podem ser servidos por uma fase específica que permita o escoamento da procura dessas viragens que não tenha sido escoada no final da fase ordinária onde estes movimentos são servidos por uma solução do tipo “verde com oposição”.

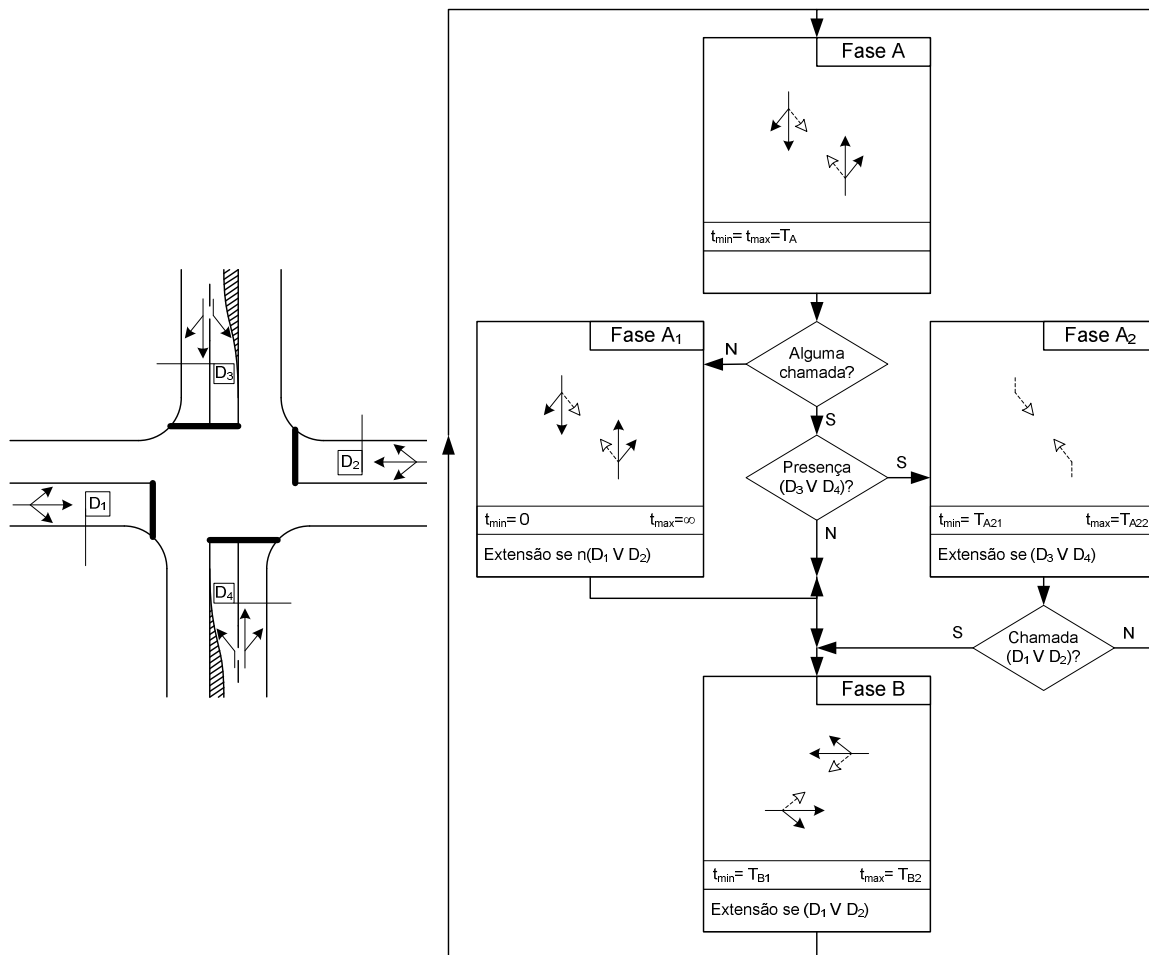


FIGURA 2.6 – SOLUÇÃO SEMI-ACTUADA COM FASE ESPECIAL PARA AS VIRAGENS À ESQUERDA

2.3.2.5. SOLUÇÕES COM ACTIVAÇÃO DINÂMICA DE FASES PEDONAIS

A Figura 2.7 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento semi-actuado, possuidor de uma fase especial onde todos os atravessamentos pedonais são servidos.

A actuação da fase pedonal faz-se através da utilização por parte dos peões de botoneiras que funcionam como sensores de presença com memória. A fase pedonal é privilegiada face às restantes fases mas requer uma participação activa dos peões, que poderá ser bastante melhorada através de uma interacção em tempo real entre o sistema e os utilizadores, com a confirmação da recepção das chamadas e da indicação do tempo previsto de espera.

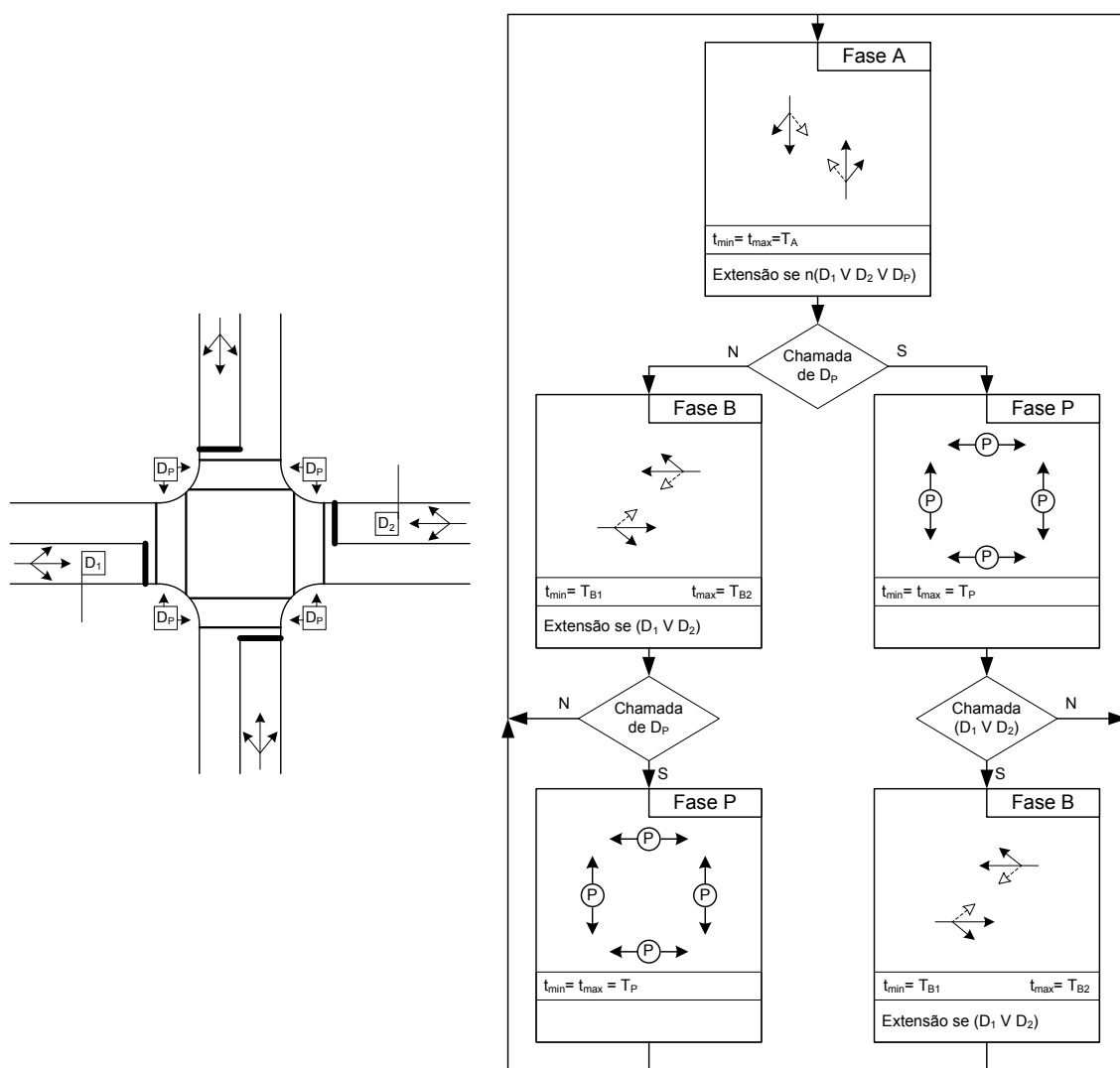


FIGURA 2.7 – SOLUÇÕES COM ACTIVACÃO DINÂMICA DE FASE PEDONAL EXCLUSIVA

Note-se também no fluxograma que a sequência de fases pode ser qualquer uma dependendo da sequência de chegadas de veículos e peões embora, havendo procura para tal quando termina a fase motorizada principal, deverá ser dada prioridade à fase pedonal relativamente à fase motorizada secundária.

Este tipo de solução permite servir com grande segurança os atravessamentos pedonais, já que estes se efectuam sem oposição dos veículos, embora quando os peões precisam de atravessar dois dos eixos rodoviários tal implique que o façam ao longo de dois ciclos sucessivos.

Por outro lado há que ter em atenção que a formalização de uma fase exclusiva para peões pode ser uma solução bastante penalizadora da capacidade global de escoamento do tráfego automóvel. Quando esta penalização é inaceitável podem ser adoptadas soluções intermédias, menos penalizadoras, em que se assume a existência de atravessamentos pedonais com oposição, em que a fase que serve os

movimentos de atravessamento pedonal do eixo principal serve também os movimentos motorizados secundários podendo ser activada por qualquer destes movimentos.

Esta é a solução representada no esquema geométrico e fluxograma da Figura 2.8 onde se justifica realçar a utilização de duas sub-fases secundárias de modo a durante os períodos de ponta, onde a fase B tenderá a estender-se até à sua duração máxima, permitir a minimização dos tempos de limpeza na transição da fase secundária para a fase principal.

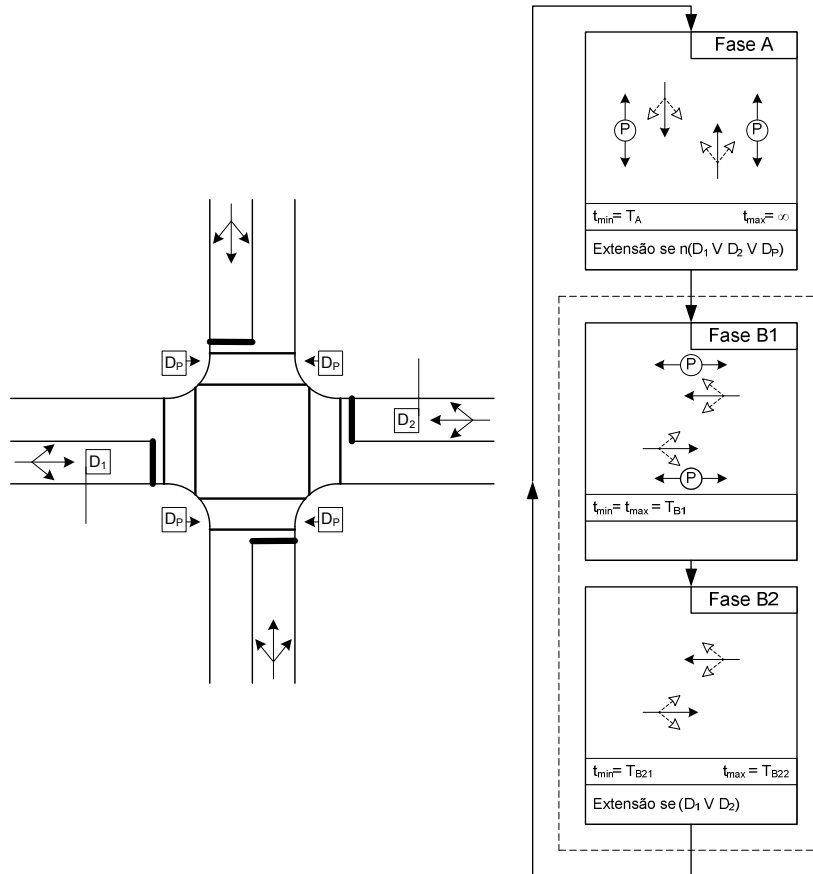


FIGURA 2.8 – SOLUÇÕES COM ACTIVACÃO DINÂMICA DE FASE PEDONAL NÃO EXCLUSIVA

Este tipo de solução não será muito aconselhado devido ao duplo conflito entre o movimento de peões e o movimento de viragem à esquerda/direita, em conjunto com o movimento para seguir em frente e o movimento de viragem à esquerda/direita.

Desta forma será viável adoptar esta solução em condições de pouca afluência de peões de forma a não penalizar, como já foi referido anteriormente, a capacidade global de escoamento do tráfego automóvel.

2.4. OUTRAS SOLUÇÕES E ESTRATÉGIAS DE ACTUAÇÃO

O conjunto de estratégias descritos de seguida é aplicável na resolução de situações mais específicas mas que podem revelar-se críticas para o funcionamento eficiente do sistema rodoviário.

Algumas destas só recentemente puderam conhecer uma aplicação mais generalizada devido ao desenvolvimento de novas soluções telemáticas viabilizadas pelos recentes avanços ao nível da informática e telecomunicações.

2.4.1. ESTRATÉGIAS ANTI-BLOQUEIO

Este tipo de estratégia é aplicável a situações onde, no próprio cruzamento em estudo, a extensão das durações das fases podem criar situações de bloqueio e não escoamento de algumas correntes de tráfego que estão a receber verde devido ao crescimento exagerado de filas de trânsito de correntes de tráfego que estão num estágio de vermelho.

Este é por exemplo o caso dos movimentos de viragens à esquerda a partir de vias segregadas de extensão limitada (ver a Figura).

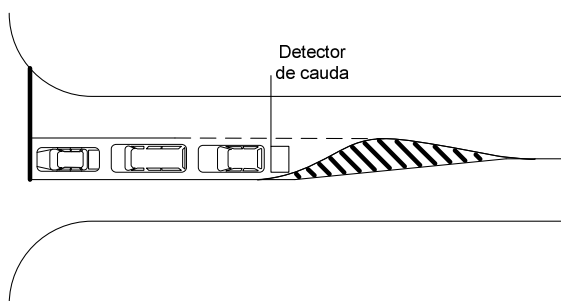


FIGURA 2.9 – EXEMPLO DE USO DE DETECTOR DE CAUDA EM VIAS SEGREGADAS DE VIRAGEM À ESQUERDA

Neste caso, se estes movimentos são servidos através de uma situação de verde com oposição em paralelo com o verde dado aos movimentos de atravessamento, verificando-se uma capacidade muito limitada, ou se são mesmo servidos em fase autónoma num tempo posterior à fase que serve os movimentos de atravessamento, pode verificar-se uma situação em que as respectivas filas de espera encham as vias de “stockagem” e comecem a invadir a via de acesso comum a outros movimentos bloqueando a sua mobilidade.

Esta situação pode, muitas vezes, ser evitada ou minimizada através da utilização de um detector de cauda capaz de detectar a existência de uma fila estacionária de dimensão potencialmente crítica (trata-se assim de um detector de presença sem memória), o que poderá permitir despoletar um faseamento da regulação alternativo que poderá passar ou pela antecipação do serviço das viragens à esquerda ou pelo fecho antecipado do serviço das correntes de tráfego em risco de serem afectadas.

Este tipo de estratégia é também aplicável quando o congestionamento num cruzamento ou a sua tendência para criação de filas transitórias de dimensão significativa resultantes da utilização de ciclos

elevados começa a provocar o bloqueio de um cruzamento localizado a montante de uma das entradas (ver a Figura 2.10).

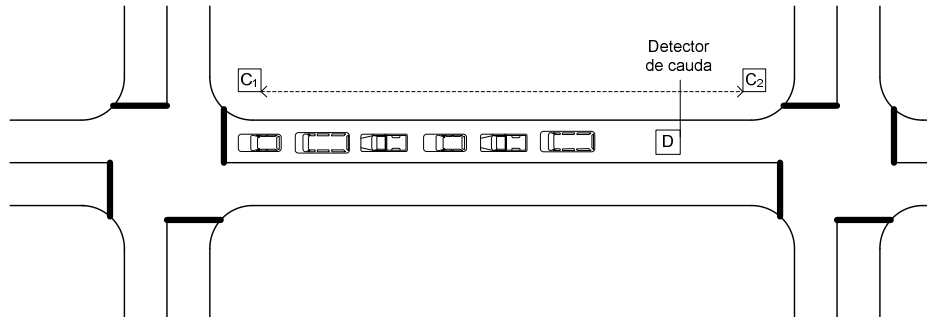


FIGURA 2.10 – EXEMPLO DE USO DE DETECTOR DE CAUDA EM ACESSOS CONGESTIONADOS

Neste caso, mesmo sem se avançar para uma gestão centralizada e coordenada da rede rodoviária, será eventualmente possível prevenir a ocorrência destas situações através da implantação dos mesmos sensores de cauda em secções onde a presença de filas estacionárias indique o risco mais ou menos iminente de ocorrência dos bloqueios.

A informação recolhida através destes sensores poderá então ser encaminhada ou para o controlador do cruzamento que está a provocar o problema, para que no seu plano de regulação seja activada uma sequência de fases que permita aumentar o escoamento na entrada problemática, ou poderá ser encaminhada para o controlador do cruzamento a montante para que neste o afluxo de tráfego ao dito acesso seja reduzido.

Um outro tipo de estratégia, com níveis de aplicação cada vez mais importantes, centra-se na utilização dos chamados “sistemas de detecção de incidentes (ocorrências excepcionais com impacto significativo no desempenho da rede)”, inseridos em sistemas e estratégias integrados de gestão operacional de redes rodoviárias.

Nestes casos os sistemas de detecção são utilizados para a identificação rápida de roturas de escoamento do tráfego em secções importantes da rede, que podem ocorrer quando, por exemplo, se verifica a ocorrência de um acidente.

Esta detecção pode ser baseada na informação conjuntamente recolhida por sensores de passagem existentes a jusante do incidente, capazes de registar um súbito abaixamento do fluxo de tráfego, e por sensores de presença existentes a montante do incidente, capazes de registar um aumento súbito da taxa de ocupação da via.

Os dados assim recolhidos podem então ser utilizados para activar precocemente os relevantes serviços de emergência, melhorando a qualidade da resposta dos serviços de emergência médica, e reduzindo o período durante o qual as condições de escoamento estão afectadas, minimizando assim a magnitude do seu impacto quer em termos de demoras médias criadas, quer em termos de dimensão da rede rodoviária afectada.

2.4.2. VARIAÇÃO DINÂMICA DA PRIORIDADE DE CADA CORRENTE DE TRÁFEGO

Este tipo de estratégia é tendencialmente particularmente útil nos casos onde existem pontos de conflito significativos entre veículos motorizados e peões com os padrões temporais dos fluxos pedonais a registarem picos muito intensos mas de curta duração. É o caso, por exemplo, de uma passadeira semaforizada localizada junto a uma gare intermodal.

Nestes casos os novos sistemas de detecção e contagem remota de peões, desenvolvidos com base por exemplo em sistemas de micro-ondas ou infravermelhos, podem ser utilizados para que, sem significativo prejuízo para o tráfego motorizado, seja pontualmente dada prioridade quase absoluta aos picos de procura pedonal, com óbvias vantagens ao nível das demoras e segurança destes utentes.

Também na regulação das necessidades conflitantes entre diferentes correntes de tráfego onde uma delas possa registar períodos repetidos mas não totalmente previsíveis no tempo com picos de procura de curta duração (por exemplo junto a grandes parques de estacionamento que sirvam eventos pontuais), será eventualmente útil a utilização de uma estratégia de atribuição pontual de uma maior prioridade de acesso a essa corrente de tráfego.

Esta estratégia poderá ser implementada através da localização adequada de um sensor de passagem capaz de contagem de veículos de modo a que esses afluxos anormais de tráfego possam ser detectados com antecedência e a respectiva informação possa ser utilizada para a adopção da regulação dos sinais luminosos mais adequada.

2.4.3. SOLUÇÕES ESPECIAIS DE APOIO AO PEÃO E MINIMIZAÇÃO DE DEMORAS DOS VEÍCULOS

O aparecimento e vulgarização de novos sistemas de detecção da presença e mobilidade dos peões criou a oportunidade para o desenvolvimento de novas estratégias de regulação dos atravessamento pedonais, particularmente em travessias isoladas, com o intuito de, por um lado, minimizar as demoras impostas aos peões e aumentar a sua segurança de atravessamento e, por outro, evitar demoras escusadas aos veículos motorizados.

Foram assim, por exemplo, já estudadas estratégias de manipulação da “janela” de oportunidade de abertura da fase pedonal através da detecção antecipada da aproximação dos peões à travessia (através de sensores de movimento) usada para, de acordo com as necessidades, antecipar ou atrasar os processos de transição de fases no plano de regulação e permitir assim que a oferta de verde ao peão possa ser feita mais próximo do momento em que este confirma a sua presença através da utilização da botoneira.

Também uma estratégia de apoio a peões atrasados, na terminologia anglo-saxónica designados de *late-comers*, ou com especiais dificuldades de mobilidade, que se encontram ainda na travessia quando está iminente o final do período de limpeza dos peões, é possível através da utilização de sensores capazes de detectar o movimento dos peões.

Esta detecção poderá depois ser utilizada ao nível do plano de regulação para se proceder à extensão muito limitada do tempo de limpeza de modo a que, sem o peão se aperceber para evitar o abuso do sistema, este possa ser ajudado e sejam evitados alguns conflitos com o tráfego motorizado.

Finalmente é também possível adoptar uma estratégia de minimização de demoras “inúteis” por parte do tráfego motorizado que ocorrem quando um peão prime a botoneira de um atravessamento pedonal e depois atravessa ainda no vermelho, fazendo com que a posterior abertura da fase de verde para os

peões seja no mínimo inútil e, muitas vezes penalizadora e frustrante para os condutores dos veículos afectados.

A ocorrência deste tipo de situação pode ser reduzida através da utilização junto aos pontos de travessia de sensores de presença (sem memória) de peões, que permitam ao sistema validar a continuada relevância da chamada feita pelos peões usando a botoneira. Existem já comercializados sensores do tipo “tapete” que funcionam em resposta à pressão imposta pelo peso dos peões.

2.4.4. ESTRATÉGIAS DE ATRIBUIÇÃO DE PRIORIDADE A VEÍCULOS ESPECIAIS

As soluções tecnológicas presentemente disponíveis permitem o desenvolvimento de soluções de regulação semafórica onde, em tempo real, é dada prioridade absoluta ou relativa a determinados utentes do sistema rodoviário.

Podem justificar tratamento prioritário, muitas vezes absoluto, os chamados “veículos prioritários”, que incluem os veículos de emergência médica, dos bombeiros ou das forças policiais, quando em marcha de emergência. Pela sua maior eficiência no transporte de pessoas, podem também justificar alguma prioridade, embora normalmente não absoluta, os veículos de transportes colectivos.

A solução tecnológica mais simples, que utiliza sensores electromagnéticos colocados no pavimento, só tem aplicabilidade no apoio aos TC e em situações onde o acesso destes veículos ao cruzamento em causa se faz através de vias exclusivas do tipo BUS.

Neste tipo de solução são colocados detectores de passagem em pontos localizados a montante do cruzamento onde se pretende atribuir a prioridade, a uma distância suficiente de modo a que a informação recolhida possa ser utilizada na lógica de regulação do cruzamento.

Pelo contrário, as novas tecnologias, já atrás referidas, baseadas na utilização de *transponders* colocados nos veículos prioritários e de receptores colocados à beira dos arruamentos em pontos a montante dos cruzamentos em causa, ao permitirem a identificação destes veículos mesmo quando estes circulam integrados nas correntes de tráfego normais, permitem já a sua aplicação num número bastante mais alargado de situações.

Em qualquer dos casos as soluções de regulação actuada destinadas à atribuição de tratamento preferencial a determinados tipos de utentes do sistema baseiam-se no essencial na incorporação nos respectivos planos das seguintes estratégias:

- Antecipação da fase que serve o acesso utilizado pelo veículo prioritário, quando este é detectado a montante do cruzamento num momento em que esse acesso está encerrado e em que tal situação se manterá quando o veículo chegar ao cruzamento se não se modificar a sequência normal do plano de regulação;

- Prolongamento da fase que serve a via usada pelo veículo prioritário, quando ele é detectado a montante do cruzamento num momento em que esse acesso está aberto mas estando previsto o seu encerramento antes do veículo chegar ao cruzamento, se não existir uma alteração da sequência normal do plano de regulação.

Note-se que a aplicação do princípio, acima enunciado, de diferenciação do grau de prioridade dos veículos dependendo da sua função, leva a que a activação destes processos de antecipação ou prolongamento de fase não seja sempre automática, podendo, relativamente aos veículos menos prioritários, ser condicionada à existência de uma “janela” de oportunidade pré-definida no plano de regulação.

2.4.5. ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DOS IMPACTOS DO CONGESTIONAMENTO NA REDE

Em espaços urbanos onde se verificam problemas significativos de congestionamento e onde não é possível ou desejável um aumento significativo da capacidade global de escoamento do tráfego, recorre-se por vezes a estratégias de controlo inteligente deste congestionamento de modo, não a eliminá-lo ou mesmo a reduzi-lo, mas antes a minimizar o seu impacto negativo. Tal passa por conseguir que os fenómenos de congestionamento tendam a ocorrer em zonas onde o seu impacto seja menor quer relativamente às condições de circulação dos vários utentes rodoviários, particularmente os transportes colectivos, quer sobre a qualidade urbana e ambiental dos diversos espaços da zona intervencionada.

Para tal, em redor das zonas da rede que se pretende sejam protegidas da ocorrência de congestionamento, e em pontos a montante dos quais existem condições para, com custos aceitáveis, acomodar fenómenos de formação sistemática de filas de tráfego não transitórias, é implementado um conjunto de “portões virtuais” de controlo dos afluxos de tráfego a essas zonas.

Estes portões virtuais mais não são do que sistemas actuados de sinais luminosos onde alguns dos sistemas de detecção são utilizados para a quantificação dos fluxos de tráfego que estão a afluir na direcção da rede da zona a proteger, sendo depois essa informação utilizada ao nível dos planos de regulação para garantir que, em cada momento, só serão servidos os veículos que se considera serem “suportáveis” por essa parte da rede.

2.4.6. ESTRATÉGIAS DE RECURSO

Em todos os planos actuados é desejável a existência de regras de regulação de excepção que possam ser activadas de forma automática quando se verifica uma anomalia nas condições de funcionamento dos detectores, como sejam a sua avaria e consequente desactivação ou a sua activação permanente devido, por exemplo, a um veículo indevidamente estacionado.

No caso de avarias, os sistemas podem estar preparados para emitirem avisos, eventualmente através de contacto remoto para uma central de comando, sempre que os sensores não registarem nenhuma detecção durante um determinado período. Para estes casos muitos dos sistemas comercializados apresentam já soluções tipo de intervenção pré-definidas.

No caso de interferência com activação permanente devido a estacionamento indevido, é também possível definir um processo de identificação deste tipo de situação através da medição da taxa de ocupação registada pelo sensor, que sempre que, durante um determinado período ultrapassar um valor médio pré-estabelecido, implicará a activação de um plano de recurso que despreze a informação desse sensor.

3 ESTUDO DE UMA INTERSECÇÃO

3.1. INTERSECÇÃO A REGULAR

O cruzamento em questão está situado entre a Rua de Domingos Machado e a Rua de Pedro Hispano, encontrando-se relativamente perto da Casa de Saúde e da Rotunda da Boavista.

No que se refere à Rua de Pedro Hispano, esta liga-se perpendicularmente à Rua do Monte dos Burgos e dá seguimento à Rua da Constituição. Permite ainda a ligação à Avenida de Sidónio Pais que nos dá acesso ao Estádio do Bessa. No seu término liga-se à Avenida da Boavista.

A Rua de Domingos Machado liga-se à Rua de Francos.



FIGURA 3.1 – LOCALIZAÇÃO DA INTERSECÇÃO A REGULAR

3.1.1. BASE DE DADOS

Inicialmente foram feitas contagens dos volumes de tráfego afluentes a cada uma das ruas, pormenorizados na figura 3.2 e 3.3, de forma a obter dados relativos à procura.

Esta abordagem inicial é de grande importância na medida em que dá a conhecer as exigências impostas à intersecção, para as quais é necessário efectuar os respectivos dimensionamentos em conjunto com um número de factores que serão estudados posteriormente.

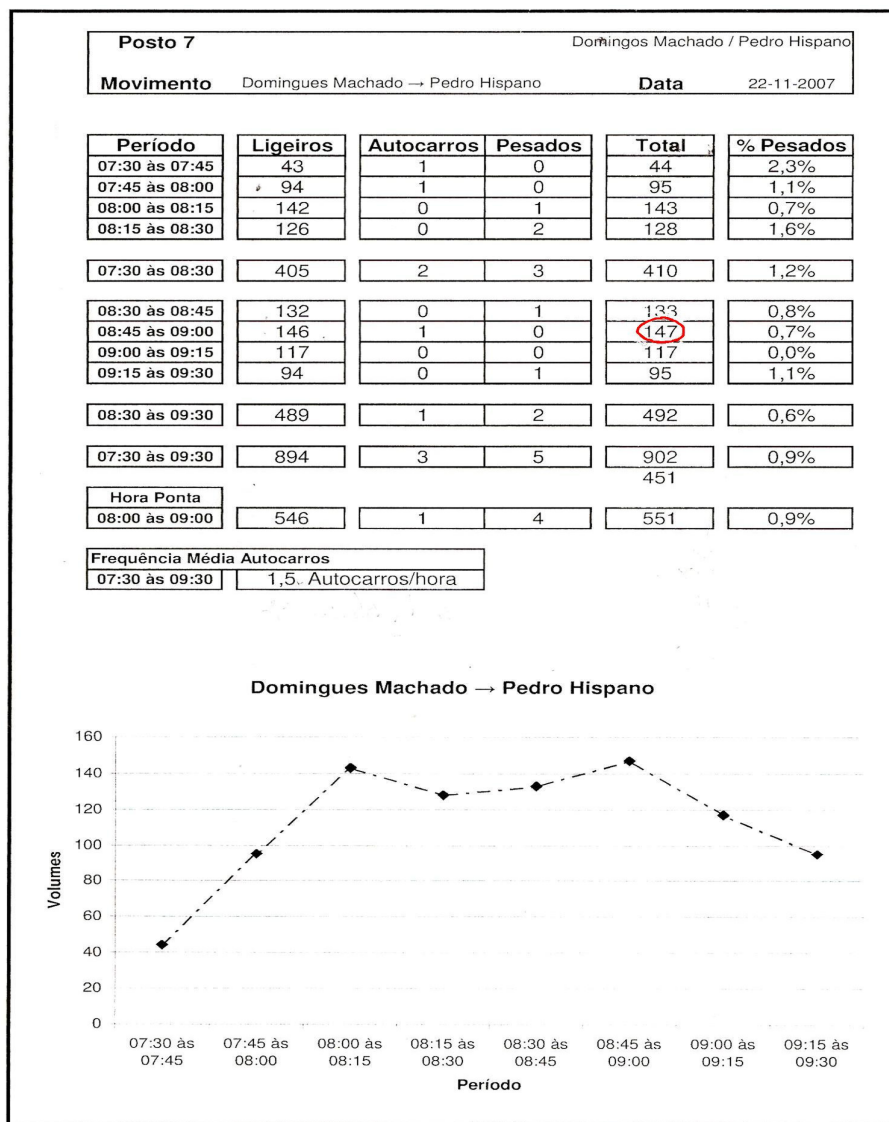


FIGURA 3.2 – DADOS INICIAIS DE VOLUMES DE TRÁFEGO DA RUA DOMINGUES MACHADO

De notar o valor assinalado, 147 veículos, correspondente ao fluxo máximo de veículos que ocorreu das 08:45 às 09:00.

Para efeitos de dimensionamento considerou-se por hora – $147 \times 4 = 588$ veíc./h

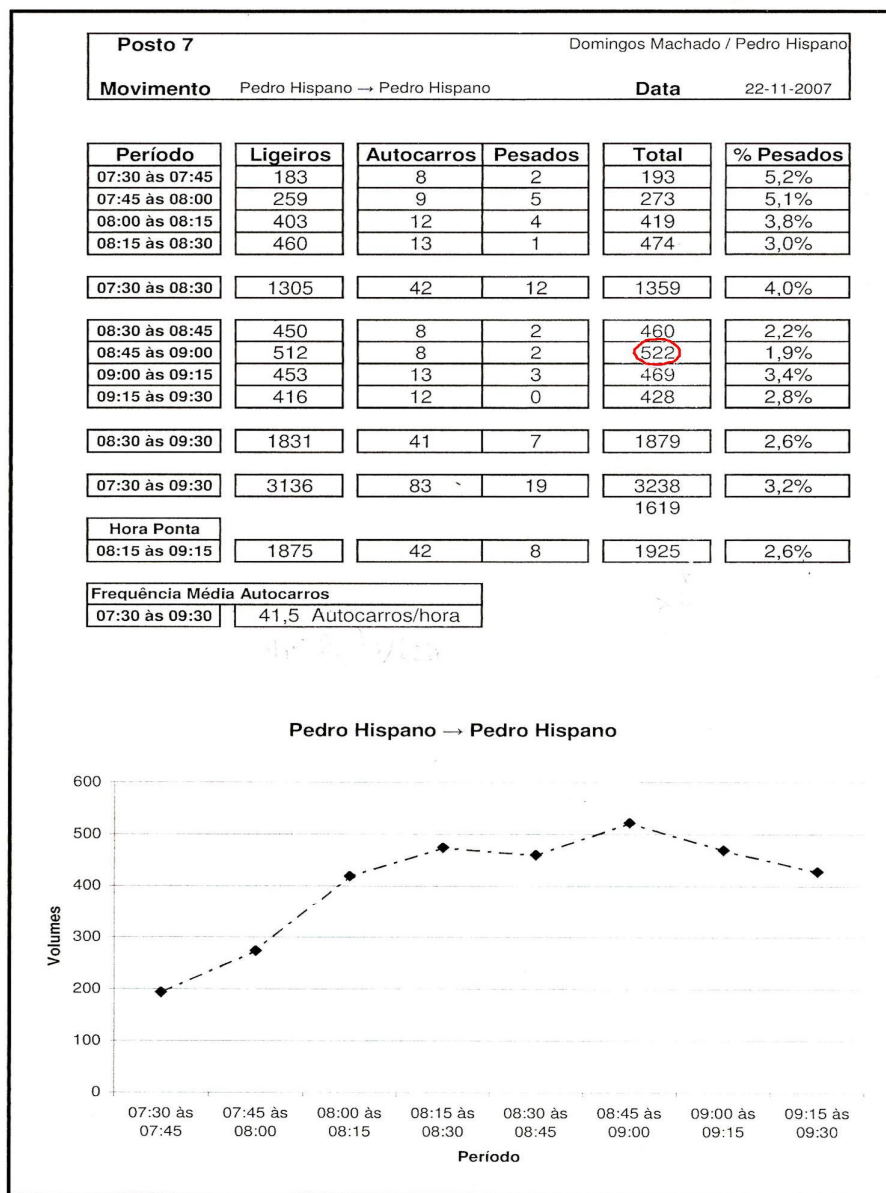


FIGURA 3.3 – DADOS INICIAIS DE VOLUMES DE TRÁFEGO DA RUA PEDRO HISPANO

De notar o valor assinalado, 522 veículos, correspondente ao fluxo máximo de veículos que ocorreu das 08:45 às 09:00.

Para efeitos de dimensionamento considerou-se por hora – $522 \times 4 = 2088$ veíc./h

3.1.2. PLANO DE REGULAÇÃO

Na definição do plano de regulação é também de grande importância estabelecer um esquema de fases, já que é dessa forma que se estabelece a ordem de execução dos movimentos necessários ao funcionamento do cruzamento.

Nas figuras 3.4 e 3.5 estão representadas as fases estabelecidas assim como os movimentos que lhe estão associados.

É também de referir para melhor compreensão do estudo que se segue a atribuição de números (1 a 5) às vias que compõem o cruzamento, também esquematizadas nas figuras 3.4 e 3.5.

FASE A

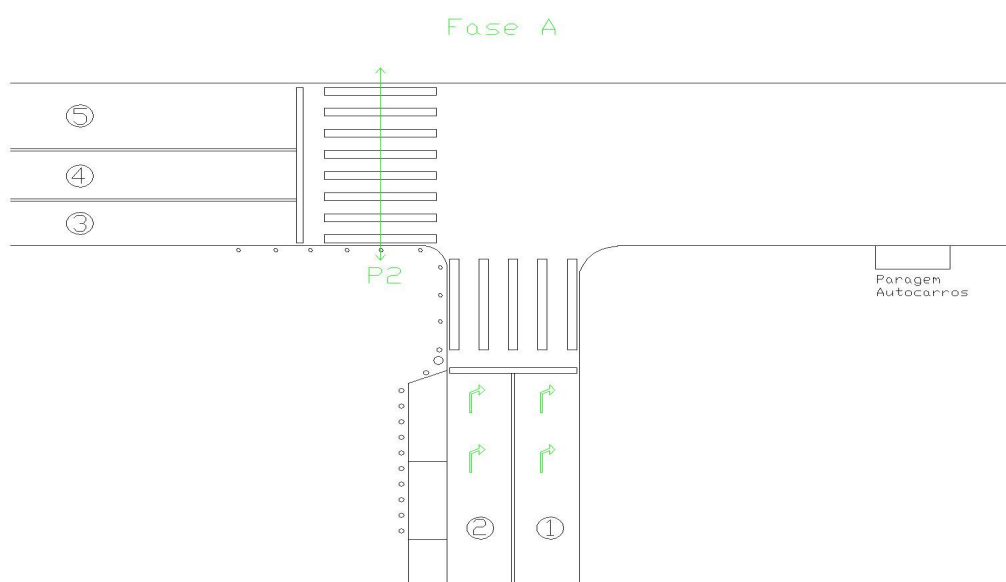


FIGURA 3.4 – PLANO DE REGULAÇÃO – FASE A

A Fase A é composta pelos movimentos 1 e 2 (Vias 1 e 2) correspondentes às vias actuadas (secundárias) e pelo movimento dos peões P2.

FASE B

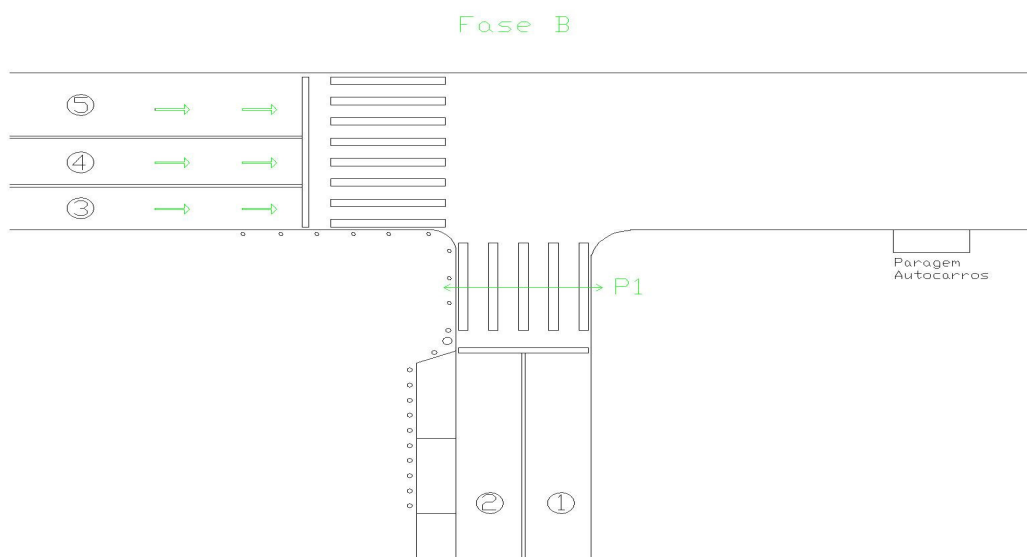


FIGURA 3.5 – PLANO DE REGULAÇÃO – FASE B

A Fase B é composta pelos movimentos 3, 4 e 5 (Vias 3, 4 e 5) correspondentes às vias não-actuadas (principais) e pelo movimento dos peões P1.

3.2. DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO E TEÓRICO

3.2.1. DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO

Existem vários métodos para a medição no terreno do débito de saturação. Entre eles o método Webster, é de aplicação simples e apresenta a vantagem de, com um ligeiro esforço adicional, permitir a obtenção de outros parâmetros relevantes na modelação dum cruzamento regulado por sinais luminosos.

Para aplicar o método Webster contam-se, em cada ciclo, os veículos que partindo da situação de parados em fila, atravessam a linha de paragem nos seguintes três períodos de tempo:

- Período inicial constituído pelos primeiros dez segundos de verde;
- Período intermédio que decorre após o período inicial e termina no fim do tempo de verde saturado, isto é, no instante de passagem do último veículo que foi obrigado a parar ou no fim do verde real, dependendo do que acontecer primeiro.
- Período final que corresponde ao tempo para além do final do verde, contado desde o início do tempo de amarelo até à passagem do último veículo do ciclo em estudo, que esteve presente na fila de espera.

Para além da contagem dos veículos nos três períodos referidos, deve também ser medido o tempo de verde saturado, bem como a duração do verde real. Estes dois valores serão iguais sempre que a fila de espera permanece para além do fim do tempo de verde. O número de veículos que passam durante o tempo de verde saturado corresponde à soma dos veículos que chegaram durante o tempo de vermelho com os que entretanto foram chegando durante o tempo de verde, mas estão impedidos de avançarem porque à sua frente a fila de espera ainda não se dissipou.

Nº ciclo	Período inicial (veíc.)	Período intermédio (veíc.)	Período final (veíc.)	Tempo de saturação (s)	Tempo de verde (s)
1	3	12	1	35	35
2	3	6	-	24	30
3	3	23	1	52	52
4	2	-	-	-	12
5	4	10	-	34	42
6	3	16	-	43	49
7	3	8	-	28	37
...
Total	X1	X2	X3	X4	X5
Amostra	N1	N2	N3	N4	N5

TABELA 3.1 – EXEMPLO MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO

Relativamente às contagens efectuadas podem ocorrer as seguintes situações:

- Registo nos três períodos o que significa ter um tempo de verde integralmente saturado;
- Registo nos dois primeiros períodos o que corresponde a um tempo de verde saturado inferior à duração do verde;
- Registo apenas no período inicial, pelo que o tempo de verde saturado é inferior a dez segundos. Tendo em conta que o período inicial é fixado para, com alguma folga, atender às perturbações devidas ao arranque dos veículos, admite-se que nestas condições não se chega a atingir o débito de saturação, pelo que estas contagens serão eliminadas.

O procedimento descrito deve ser repetido cerca de 30 ciclos válidos, a fim de se obterem valores fiáveis.

Na

Tabela 3.1 mostra-se um exemplo de registo das contagens feitas numa via de um ramo de entrada dum cruzamento regulado por sinais luminosos.

O débito de saturação (s) pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$s = \frac{X_2}{X_4 - 10N_4} \quad (1)$$

em que,

X_1 - número total de veículos contados no período inicial

X_2 - número total de veículos contados no período intermédio

X_3 - número total de veículos contados no período final

X_4 - tempo total de verde saturado

N_1, N_4 - número de ciclos válidos (c/ tempo de saturação superior a 10 s)

N_3 - número total de períodos finais observados

Sendo sempre preferível medir localmente o débito de saturação, há algumas condições que terão de se verificar para garantir que os valores encontrados são credíveis. Para além da necessidade do cruzamento em estudo dispor de sinalização luminosa, já referida anteriormente, este método de medição exige que sejam encontrados valores representativos em cada um dos períodos, particularmente nos dois primeiros, o que obriga a alguns cuidados na escolha do período de observação.

3.2.2. DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO

Os modelos de estimação do débito de saturação devem reproduzir tanto quanto possível fielmente as partidas dos veículos, sendo estas dependentes de um vasto conjunto de características geométricas e condições de circulação que torna impossível incluírem no modelo. É, assim, necessário seleccionar os factores mais importantes que afectam as partidas dos veículos, para os quais se conheça com suficiente rigor a respectiva influência.

A estimação do débito de saturação é feita isoladamente para cada via, pelo que no caso da corrente de tráfego ocupar mais do que uma via, o débito de saturação respectivo resulta da soma dos débitos de saturação das vias que lhe estão afectas.

Neste modelo adopta-se a formulação clássica de considerar um valor para o débito de saturação que corresponda ao valor expectável para determinadas condições geométricas e de circulação que, a não serem garantidas, será necessário corrigir com recurso a factores de ajustamento.

Por outro lado considera-se que as correntes de tráfego, para este efeito, podem ser agrupadas em correntes de tráfego sem oposição e correntes de tráfego com oposição, conforme os veículos não tenham ou tenham de dar prioridade a veículos de outras correntes de tráfego. Em qualquer destes grupos ainda se pode considerar se a via é exclusiva ou se é partilhada pela presença de dois ou mais movimentos de veículos.

O valor do débito de saturação base é de 1900 uvl/h, que se verifica se forem satisfeitas as seguintes condições:

- Via exclusiva para movimento em frente sem oposição;
- Corrente de tráfego constituída apenas por veículos ligeiros;
- Largura da via igual a 3,3 metros numa extensão que garanta uma permanente partida de veículos;
- Perfil longitudinal da via em patamar;
- Localização do cruzamento em zona de características médias e via afastada do passeio.

Corrente de tráfego sem oposição em via exclusiva

O débito de saturação, s é dado neste caso pela seguinte expressão:

$$s = 1900 f_w f_i f_z f_p f_l f_d \quad (2)$$

em que,

f_w – factor de ajustamento devido à largura da via

f_i – factor de ajustamento devido ao declive da via

f_z – factor de ajustamento devido à localização do cruzamento

f_p – factor de ajustamento devido à localização da via

f_l – factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego

f_d – factor de ajustamento devido à mudança de direcção

A largura da via w é uma das características geométricas que mais afecta a partida dos veículos. Para vias de largura inferior a 3,3 metros admite-se que por cada metro de redução da largura da via corresponde uma diminuição de cerca de 200 uvl/h do débito de saturação, enquanto que em vias de largura superior a 3,3 metros corresponde, por metro, a uma variação de 100 uvl/h. O factor de ajustamento f_w é, assim, obtido através de:

$$f_w = \begin{cases} 0,105 w + 0,653 & 2,5 < w < 3,3 \\ 0,053 w + 0,826 & 3,3 < w < 5,0 \end{cases} \quad (3)$$

O perfil longitudinal tem um efeito positivo ou negativo no débito de saturação conforme a via esteja a descer, facilitando a partida dos veículos, ou a subir, dificultando-a.

Este efeito traduz-se pela variação do débito de saturação em 2% por cada 1% de variação do declive, pelo que o factor de ajustamento f_i pode ser calculado a partir de:

$$f_i = 1 - 2i \quad (4)$$

onde i é o declive da via (formato decimal), sendo positivo nas subidas e negativo nas descidas.

A influência da localização do cruzamento nos débitos de saturação reflecte a soma de pequenos factores que dificultam a partida dos veículos, tais como a visibilidade, a interferência dos peões, as manobras de estacionamento, a entrada/saída de passageiros dos autocarros ou táxis, etc. Sendo difícil isolar cada um destes factores opta-se por considerar o seu efeito conjunto, tendo em conta a seguinte classificação para a localização do cruzamento, encontrando-se entre parêntesis os respectivos valores para o factor de ajustamento f_z :

- Classe A ($f_z=1,1$) – corresponde a uma zona residencial ou suburbana, onde a visibilidade é boa, sendo nulas ou reduzidas as restrições à liberdade de manobra dos condutores provocadas pela presença de peões, rotatividade do estacionamento ou paragens de autocarros.

- Classe B ($f_z=1,0$) – corresponde a uma zona de características médias onde as perturbações à partida dos veículos são moderadas.

- Classe C ($f_z=0,9$) – corresponde às zonas centrais em que quer o elevado volume de peões, quer as múltiplas manobras de estacionamento, paragem para a entrada e saída de passageiros, bem como para as operações de carga e descarga têm um efeito sensível no escoamento do tráfego.

O efeito acumulado dos factores referidos anteriormente depende da posição da via de tráfego no ramo de entrada do cruzamento, sendo maior para a via de tráfego situada junto ao lancil pelo que, neste caso, adopta-se um factor de ajustamento $f_p = 0,95$.

Como se referiu o valor base do débito de saturação diz respeito a tráfego equivalente expresso em unidades de veículos ligeiros por hora. Para atender à composição do tráfego será necessário usar os coeficientes de equivalência de cada classe de veículos e que representam o número de veículos ligeiros que nas mesmas condições produzem o mesmo efeito na partida dos veículos que um veículo de determinada classe.

Este factor permite, assim, converter os débitos homogeneizados em débitos reais. Assim sendo, o factor de ajustamento f_i será dado pela seguinte expressão:

$$f_i = \frac{1}{1 - \sum p_i + \sum p_i E_i} \quad (5)$$

em que,

p_i – proporção de veículos da classe i (excepto veículos ligeiros)

E_i – coeficiente de equivalência dos veículos de classe i (excepto ligeiros)

Os coeficientes de equivalência a adoptar são:

Veículo comercial médio	1,5
Veículo comercial pesado	2,3
Autocarro.....	2,0
Veículo de duas rodas com motor	0,4
Bicicleta.....	0,2

Nas mudanças de direcção os veículos avançam com velocidades mais baixas, sendo este efeito representado pelo factor de ajustamento f_d dado por:

$$f_d = \frac{1}{1 + 1,5/\rho} \quad (6)$$

sendo ρ o raio, em metros, da curva descrita pelo veículo na manobra de viragem.

3.3. CONSIDERAÇÕES A DESTACAR

3.3.1. CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO

O débito de saturação permite obter informações relativas à capacidade de oferta da via para a qual é calculado. Dessa forma o dimensionamento é feito em função dessa mesma capacidade e do fluxo de tráfego afluente à via.

As tabelas 3.2 e 3.3 representam o cálculo do débito de saturação correspondente às vias 2 e 1, respectivamente, de acordo com o processo descrito no subcapítulo 3.2.1.

Os restantes cálculos do débito de saturação correspondentes às vias 3, 4 e 5 encontram-se apresentados em anexo.

CASO NORMAL – VIA 2 (CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO)

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	1	-	14	24
2	4	1	1	12	12
3	3	4	-	18	24
4	4	6	1	23	23
5	4	2	-	15	17
6	4	7	3	24	24
7	4	2	1	14	14
8	4	5	2	21	21
9	4	7	1	24	24
10	4	6	-	24	24
11	4	7	1	23	23
12	4	1	-	15	18
13	4	6	1	24	24
14	4	5	2	24	24
15	3	7	2	24	24
16	4	6	1	24	24
17	4	2	1	16	16
18	4	1	-	14	16
19	4	2	-	15	18
20	5	3	-	19	22
21	3	1	-	12	15
22	4	1	-	12	15
23	4	5	-	21	24
24	3	2	-	15	18
25	3	5	-	21	24
26	4	3	-	19	22
27	4	4	1	24	24
28	4	6	2	24	24
29	4	7	2	24	24
30	3	4	-	19	22
Total	115	119	22	578	628
Amostra	30	30	15	30	

S₂ =	1541 veíc/h
q₂ =	307 veíc/h
y₂ =	0,199

TABELA 3.2 – MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 2

CASO PARTICULAR – VIA 1 (CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO)

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	1	-	12	22
2	4	1	-	13	24
3	3	-	-	-	18
4	2	-	-	-	24
5	3	-	-	-	24
6	3	1	-	12	24
7	3	2	-	14	16
8	3	-	-	-	16
9	2	-	-	-	18
10	1	-	-	-	22
11	2	-	-	-	15
12	2	-	-	-	24
13	3	1	-	14	20
14	2	-	-	-	17
15	2	-	-	-	22
16	2	-	-	-	24
17	3	-	-	-	24
18	4	1	-	12	24
19	2	-	-	-	18
20	3	1	-	13	21
21	1	-	-	-	24
22	4	-	-	-	18
23	2	-	-	-	15
24	3	1	-	13	22
25	1	-	-	-	20
26	4	1	-	13	24
27	4	-	-	-	19
28	4	-	-	-	21
29	2	-	-	-	18
30	3	1	-	12	24
Total	81	11	0	128	622
Amostra	30	10	0	10	
	s1 =	1414 veíc/h			
	q1 =	281 veíc/h			
	y1 =	0,199			

TABELA 3.3 – MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 1 (CASO PARTICULAR)

O baixo número de ciclos válidos deve-se ao facto de existirem constantemente veículos estacionados na via 1, impedindo que se forme fila e que passem veículos no período intermédio. A fig.3.6 demonstra a situação descrita.

Dessa forma, para efeitos de dimensionamento admitiram-se como suficientes os ciclos válidos obtidos para nesta via. Obtendo um valor de 1414 veíc./h que dadas as circunstâncias considera-se aceitável.



FIGURA 3.6 – VIA 1, FASE A – OBSTRUÇÃO DA VIA

3.3.2. CÁLCULO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO

Foi também calculado o débito de saturação através de processos teóricos de forma a verificar a proximidade entre os valores obtidos nos processos de cálculo utilizados, assim como tirar conclusões relativas aos parâmetros intervenientes na sua determinação.

As tabelas 3.4 e 3.5 representam o cálculo do débito de saturação correspondente às vias 2 e 1, respectivamente, de acordo com o processo descrito no subcapítulo 3.2.2.

Os restantes cálculos do débito de saturação correspondentes às vias 3, 4 e 5 encontram-se apresentados em anexo.

DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO – VIA 1

Factores de ajustamento:			
f_w - factor de ajustamento devido à largura da via	$f_w = 0,9806$	$w = 3,12$	
f_i - factor de ajustamento devido ao declive da via	$f_i = 1,02$	$i = -1$	
f_z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	$f_z = 1$	Classe A, B ou C	
f_p - factor de ajustamento devido à localização da via	$f_p = 0,95$		
f_d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	$f_d = 0,772727$	$p = 5,1$	
f_t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	$f_t = 1$	Tipo de veículo	Frequência média (veíc/h)
		Veículo comercial pesado =	0
Débito de saturação teórico (veíc/h)	$s = 1395$		
	$q_1 = 283$	veíc/h	
	$y_1 = 0,203$		

TABELA 3.4 – ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA 1

DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO – VIA 2

Factores de ajustamento:			
f_w - factor de ajustamento devido à largura da via	$f_w =$	1,01415	$w = 3,55$
f_i - factor de ajustamento devido ao declive da via	$f_i =$	1,02	$i = -1$
f_z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	$f_z =$	1	Classe A, B ou C
f_p - factor de ajustamento devido à localização da via	$f_p =$	0,95	
f_d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	$f_d =$	0,8125	$p = 6,5$
f_t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	$f_t =$	0,992469	Tipo de veículo
			Frequência média (veíc/h)
			Autocarro = 1,5
Débito de saturação teórico (veíc/h)	$S =$	1506	
	$q_2 =$	305	veíc/h
	$y_2 =$	0,203	

TABELA 3.5 – ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA2

3.3.3. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Como se admitiu relativamente aos dados iniciais começou-se por considerar um débito de $147 \times 4 = 588$ veíc./h para a fase secundária e de $522 \times 4 = 2088$ veíc./h para a fase principal, já que estes picos de fluxo ocorrem no mesmo intervalo de tempo.

Os valores de 588 veíc./h e 2088 veíc./h correspondem ao total de veículos afluentes às vias secundária e principal, respectivamente.

Desta forma, através da medição dos débitos de saturação (*utilizando os valores práticos*) de todas as vias é possível obter um relacionamento entre os débitos de chegadas e os débitos de saturação através das cargas nas correntes de tráfego e dessa forma, ponderar os débitos de chegadas de cada uma das vias recorrendo à seguinte expressão: $\frac{q_i}{s_i} = \frac{q_{total}}{q_{total}}$.

A repartição do ciclo pelo tempo de verde destinado a cada uma das fases é obtida admitindo proporcionalidade entre os tempos de verde útil e os índices de carga, o que resulta na garantia de existência de iguais graus de saturação para as correntes de tráfego críticas de cada fase.

Então, por fase, temos o seguinte: $\frac{q_1}{s_1} = \frac{q_2}{s_2} = \frac{q}{s}$, em que “q” = 588 veíc./h, e por outro lado temos,

$\frac{q_3}{s_3} = \frac{q_4}{s_4} = \frac{q_5}{s_5} = \frac{q}{s}$, em que “q” = 2088 veíc./h.

Os resultados obtidos, como comprovados em tabelas anexas são:

- $q_1 = 281$ veíc./h (prático); 283 veíc./h (teórico)
- $q_2 = 307$ veíc./h (prático); 305 veíc./h (teórico)
- $q_3 = 658$ veíc./h (prático); 671 veíc./h (teórico)
- $q_4 = 712$ veíc./h (prático); 726 veíc./h (teórico)
- $q_5 = 717$ veíc./h (prático); 692 veíc./h (teórico)

Para simulação em capítulo posterior serão usados os valores $q_2 = 307$ veíc./h (prático) e $q_5 = 717$ veíc./h (prático), já que o programa apenas contempla uma via por fase e optou-se por utilizar os valores máximos práticos de cada fase. Os tempos de verde e de ciclo foram obtidos através do seguinte formulário:

$y = \frac{q}{s}$ - Índice de carga de uma via

$Y = \max(y_A) + \max(y_B)$ - Índice de carga do cruzamento

$L = 3 + 2 + 3 + 2$ (s) - (3 = Tempo de Amarelo, 2 = Tempo de Limpeza) - Tempo perdido total na transição de fases

$$C_o = \frac{1,5L + 5}{1 - Y} - \text{Ciclo Óptimo}$$

$$C_{\min} = \frac{kL}{k - L}, k = 0,85 - \text{Ciclo Mínimo}$$

$$g_A = \frac{y_A}{Y} \cdot (C_o - L) - \text{Tempo de verde da Fase A}$$

$$g_B = \frac{y_B}{Y} \cdot (C_o - L) - \text{Tempo de verde da Fase B}$$

INDICADORES DE DESEMPENHO:

$$Q = s \cdot \frac{g}{C_o} - \text{Capacidade}$$

$$x = \frac{q}{Q} - \text{Grau de saturação}$$

$$d = \frac{C(1 - \frac{g}{C})^2}{2(1 - x\frac{g}{C})} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} - 0,65x(\frac{C}{q^2})^{\frac{1}{3}}(2 + 5\frac{g}{C}) - \text{Atraso}$$

3.3.4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

As tabelas seguintes apresentam resumidamente os valores obtidos de acordo com os processos de cálculo planificados anteriormente (a tempos fixos), tais como: os débitos por via (q), os débitos de saturação de cada via (s), os índices de carga (yc), os tempos de verde (g) e como indicadores de desempenho, a capacidade de cada via (Q), o grau de saturação (x) e o atraso por via (d).

Conclusivamente, estão também representados os valores mínimos necessários dos tempos de verde que respondem às exigências do tráfego afluente a cada uma das vias.

MÉTODO TEÓRICO:

	CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	yc	g [s]	Q [Veíc/h]	x	Atraso [s]	Atraso médio [s]
Fase A	1	283	1395	0,198965	13,7	373	0,757	17,08	10,89
	2	305	1506	0,198965	13,7	403	0,757	17,09	
Fase B	3	671	1649	0,412272	27,5	886	0,757	9,14	
	4	726	1784	0,412272	27,5	958	0,757	9,14	
	5	692	1701	0,412272	27,5	914	0,757	9,14	
Y =			0,609						
L =			10,0 s						
Co =			51,2 s						
Cmín =			35,3 s						
Cmáx =			120,0 s						
gA =			13,7 s						
gB =			27,5 s						

TABELA 3.6 – INDICADORES DE DESEMPENHO E TEMPOS DE VERDE TEÓRICOS

MÉTODO PRÁTICO:

	CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	yc	g [s]	Q [Veíc/h]	x	Atraso [s]	Atraso médio [s]
Fase A	1	281	1414	0,198965	13,5	371	0,759	17,34	10,85
	2	307	1541	0,198965	13,5	404	0,759	17,35	
Fase B	3	658	1597	0,412272	28,0	868	0,759	9,01	
	4	712	1728	0,412272	28,0	939	0,759	9,02	
	5	717	1740	0,412272	28,0	946	0,759	9,02	
Y =			0,611						
L =			10,0 s						
Co =			51,4 s						
Cmín =			35,6 s						
Cmáx =			120,0 s						
gA =			13,5 s						
gB =			28,0 s						

TABELA 3.7 – INDICADORES DE DESEMPENHO E TEMPOS DE VERDE PRÁTICOS

3.3.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Nesta primeira fase foram determinados os débitos de saturação de cada uma das vias através de processos teóricos e práticos.

Apesar da escolha dos valores obtidos por métodos práticos para efeitos de cálculos posteriores a esta fase é de salientar a proximidade entre os valores práticos e teóricos como se pode observar no caso apresentado e mais conclusivamente nas respectivas tabelas em anexo.

Relativamente ao estudo teórico é de salientar a relevância do raio de viragem da via, implicando uma redução na capacidade da via em 40-50 veículos a menos por cada metro a menos no raio de viragem.

Os valores práticos foram obtidos através de dados recolhidos no terreno, segundo o método de Webster.

Relativamente à via 1 é de referir o não cumprimento das regras relativas à determinação do débito de saturação pelo método de Webster devido ao número insuficiente de ciclos válidos, mas consideraram-se os ciclos válidos conseguidos como referência, tendo ainda em conta a não influência desta via e dos valores dos débitos desta no dimensionamento geral.

De seguida foi feito um dimensionamento a tempos fixos utilizando os débitos práticos, cujos valores serviram como base na próxima fase do presente trabalho.

3.4. SIMULAÇÃO COM SOFTWARE *AWESIM*

A avaliação do desempenho de cruzamentos regulados por sinais luminosos com comando semi-actuado é realizada geralmente por modelos desenvolvidos para sinais luminosos de tempos fixos com adaptações (simplistas), para atender à variação dos tempos de verde e de ciclo ocorridos com controlo semi-actuado. Esta falha pode ser suprimida através da utilização de simulação, desde que se garanta que esta reproduz com suficiente rigor a realidade.

O programa considera um cruzamento entre uma via secundária, munida de um semáforo actuado, e uma via principal, munida de um semáforo não actuado. É admitido um sensor na via secundária e relativamente à regulação são consideradas duas fases, uma para os veículos que atravessam a via principal e outra para os veículos que circulam na via secundária.

Procura aproximar-se das condições reais, recorrendo a aspectos relativos ao comportamento do condutor, tais como:

- Conceito de fila horizontal com ocupação de espaço, ao contrário do que acontece em certos modelos, onde é considerada a fila vertical.
- Reacção do condutor perante o aparecimento do sinal amarelo, dependendo da distância que o separa da linha de paragem.

O percurso e interacção entre os veículos são descritos segundo o modelo de *car-following (i)*.

Os parâmetros de entrada no programa de simulação são:

- Tempo de Limpeza (cálculo demonstrado em anexo)
- Tempo de Amarelo
- Verde máximo da fase actuada
- Vermelho mínimo da fase actuada, corresponde ao verde mínimo da fase não-actuada
- Extensão do tempo de verde na fase actuada
- Verde inicial na fase actuada
- Débito da fase actuada
- Débito da fase não-actuada
- Distância do sensor à linha de paragem na fase actuada

As saídas do programa de simulação são:

- Informação específica do veículo
- Distância percorrida
 - Tempo total de viagem
 - Tempo de espera
 - Velocidade média
- Leituras do sensor
 - Contagens (número de veículos por hora)

- Medidas de desempenho
 - Comprimento médio da fila de espera
 - Tempo médio de espera
 - Tempo médio de permanência no sistema
 - Percentagem de verde saturado
 - Percentagem de veículos que param
 - Comprimento médio do ciclo
 - Tempo médio de verde

(i) Para mais informações consultar: “Definição de uma estratégia optimizada de controlo de tráfego em cruzamentos usando simulação estocástica” de Maria de Lurdes de Oliveira Simões.

SEQUÊNCIA DE UMA SIMULAÇÃO:

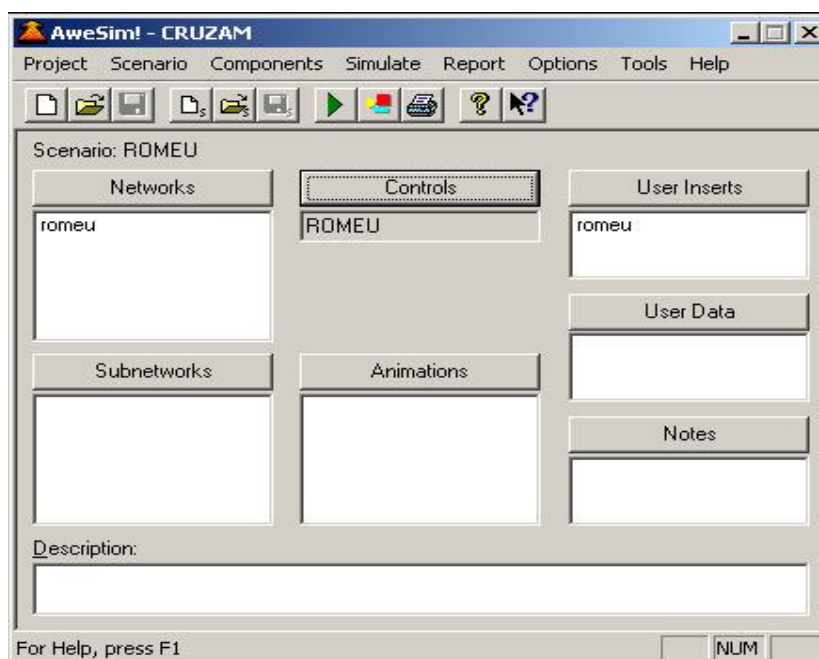


FIGURA 3.7 – INTERFACE PROGRAMA AWESIM

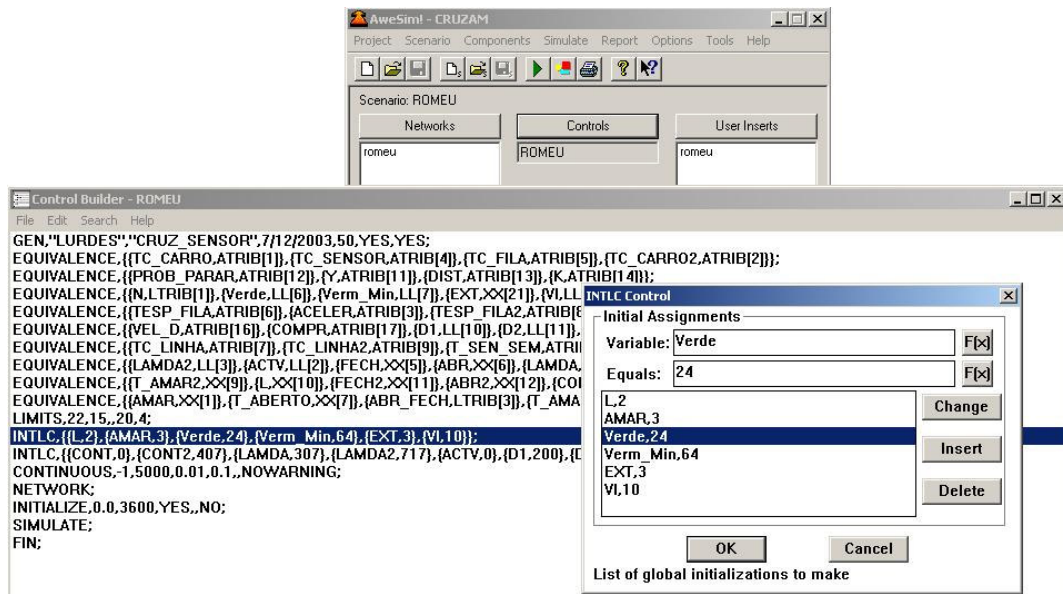


FIGURA 3.8 – INTRODUÇÃO DE PARÂMETROS

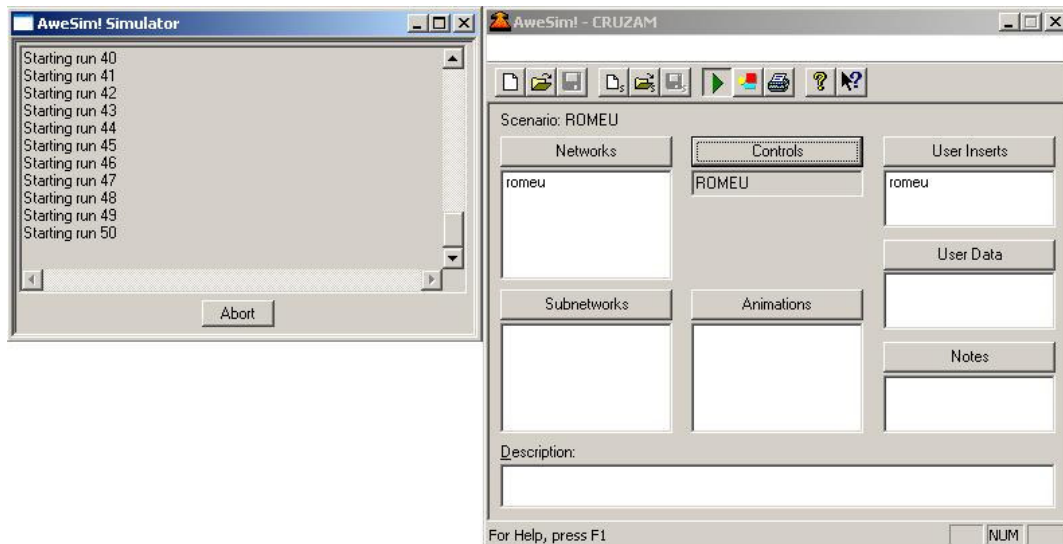


FIGURA 3.9 – SIMULAÇÃO

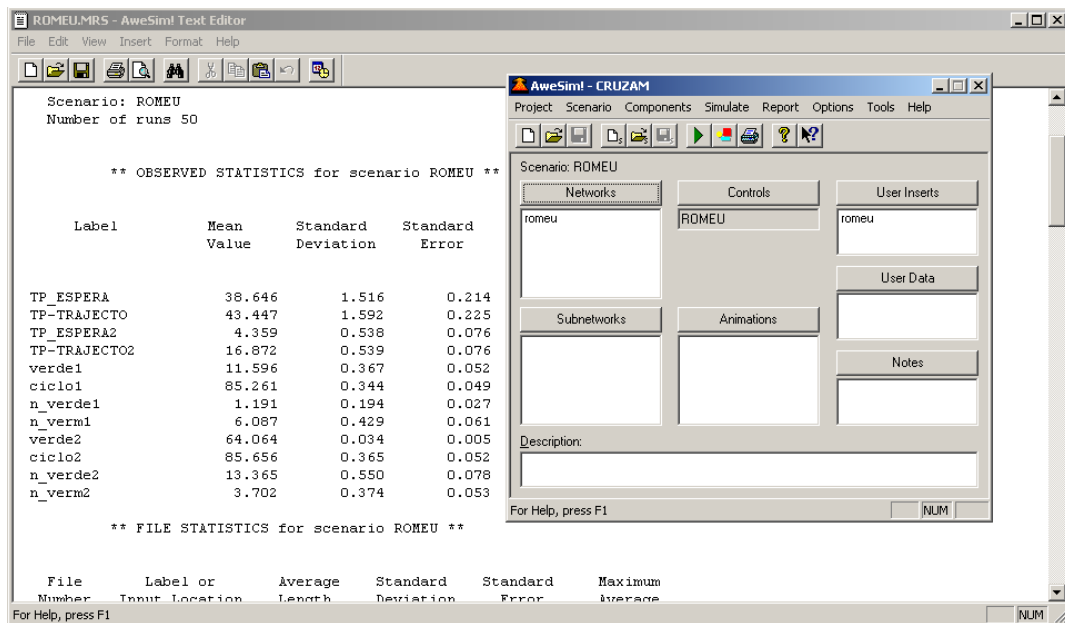


FIGURA 3.10 – RESULTADOS

Resultados: TP_ESPERA – Atraso Médio Vias Actuadas

TP_ESPERA2 – Atraso Médio Vias Não Actuadas

Verde1 – Tempo de Verde médio máximo registado nas Vias Actuadas

Nota: Para estudo e análises do presente trabalho foram feitas simulações correspondentes a 50 horas independentes, procurando representar 50 dias em período de hora de ponta.

Os resultados obtidos encontram-se representados em tabelas demonstrando a variação dos parâmetros de entrada e os respectivos valores dos Atrasos. As tabelas apresentadas são relativas aos valores óptimos encontrados do Atraso das Vias Actuadas, do Atraso das Vias Não Actuadas e do Atraso Médio Global.

3.4.1. ESTRUTURA DAS SIMULAÇÕES EFECTUADAS

As tabelas 3.8 e 3.9 são representativos do conjunto das simulações efectuadas e fazem referência aos parâmetros anteriormente referidos que conduzem aos valores óptimos do Atraso Médio Global, do Atraso da Fase Actuada e do Atraso da Fase não-actuada.

As restantes simulações encontram-se representadas em anexo.

Procurando padronizar as simulações e a obter relacionamentos entre os parâmetros envolventes adoptou-se uma variação dos intervenientes da seguinte forma:

- Foi fixado o valor de 3 segundos para o Tempo de Amarelo e de 2 segundos para o Tempo de Limpeza para todas as simulações
- Para cada conjunto de 18 simulações é definido o valor do Tempo de Verde Máximo e Vermelho Mínimo da Fase Actuada, tendo estes começado com os valores mínimos necessários obtidos através do dimensionamento a tempos fixos
- Os grupos de 18 simulações efectuadas são divididos em 3 grupos de 6 simulações em que é variado a distância do detector à linha de paragem (2 a 4 metros)
- Por sua vez cada grupo das 6 simulações anteriormente referidas é dividido em 3 grupos de 2 simulações em que é variado a extensão do tempo de verde (3 a 5 segundos)
- Por último, cada grupo das 2 simulações relativas à variação da extensão é variado com o tempo de Verde Inicial (em 8 e 10 segundos).

Em seguida são representados dois gráficos alusivos às simulações que correspondem aos valores óptimos do Atraso Médio Global e do Atraso da Fase Actuada de forma a visualizar as variações referidas.

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso – Actuada (s)	Atraso – Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	24	28	3	2	18,36	5,69	9,49	8,97
3	2	10	24	28	3	2	17,15	6,42	9,64	10,87
3	2	8	24	28	4	2	17,60	5,90	9,41	9,85
3	2	10	24	28	4	2	16,71	6,77	9,75	11,61
3	2	8	24	28	5	2	16,59	6,61	9,60	11,14
3	2	10	24	28	5	2	16,00	7,18	9,82	12,50
3	2	8	24	28	3	3	18,19	5,55	9,34	8,97
3	2	10	24	28	3	3	16,99	6,32	9,52	10,84
3	2	8	24	28	4	3	17,39	6,02	9,43	9,87
3	2	10	24	28	4	3	16,67	6,55	9,58	11,48
3	2	8	24	28	5	3	16,52	6,47	9,48	11,00
3	2	10	24	28	5	3	15,88	7,17	9,78	12,59
3	2	8	24	28	3	4	18,31	5,80	9,55	8,96
3	2	10	24	28	3	4	17,15	6,63	9,78	10,87
3	2	8	24	28	4	4	17,64	6,21	9,64	9,92
3	2	10	24	28	4	4	16,84	6,82	9,82	11,59
3	2	8	24	28	5	4	16,91	7,04	10,00	11,17
3	2	10	24	28	5	4	16,00	7,38	9,96	12,58

TABELA 3.8 – VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO MÉDIO E ATRASO DAS VIAS ACTUADAS (9,34 s e 15,88 s)

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	30	40	3	2	26,12	4,91	11,27	9,33
3	2	10	30	40	3	2	24,34	5,46	11,12	10,98
3	2	8	30	40	4	2	24,49	5,47	11,17	10,64
3	2	10	30	40	4	2	23,15	5,85	11,04	12,04
3	2	8	30	40	5	2	22,87	6,05	11,09	12,32
3	2	10	30	40	5	2	22,28	6,58	11,29	13,46
3	2	8	30	40	3	3	25,63	4,84	11,07	9,34
3	2	10	30	40	3	3	24,27	5,37	11,04	11,10
3	2	8	30	40	4	3	24,33	5,19	10,93	10,59
3	2	10	30	40	4	3	23,46	5,74	11,05	12,06
3	2	8	30	40	5	3	23,02	6,07	11,15	12,35
3	2	10	30	40	5	3	22,05	6,42	11,11	13,60
3	2	8	30	40	3	4	26,34	4,95	11,36	9,36
3	2	10	30	40	3	4	24,57	5,75	11,39	11,08
3	2	8	30	40	4	4	24,72	5,49	11,26	10,66
3	2	10	30	40	4	4	23,51	6,02	11,26	12,20
3	2	8	30	40	5	4	23,37	6,39	11,48	12,47
3	2	10	30	40	5	4	22,43	6,73	11,44	13,52

TABELA 3.9 – VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO VIAS NÃO ACTUADAS (4,84 s)

3.4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

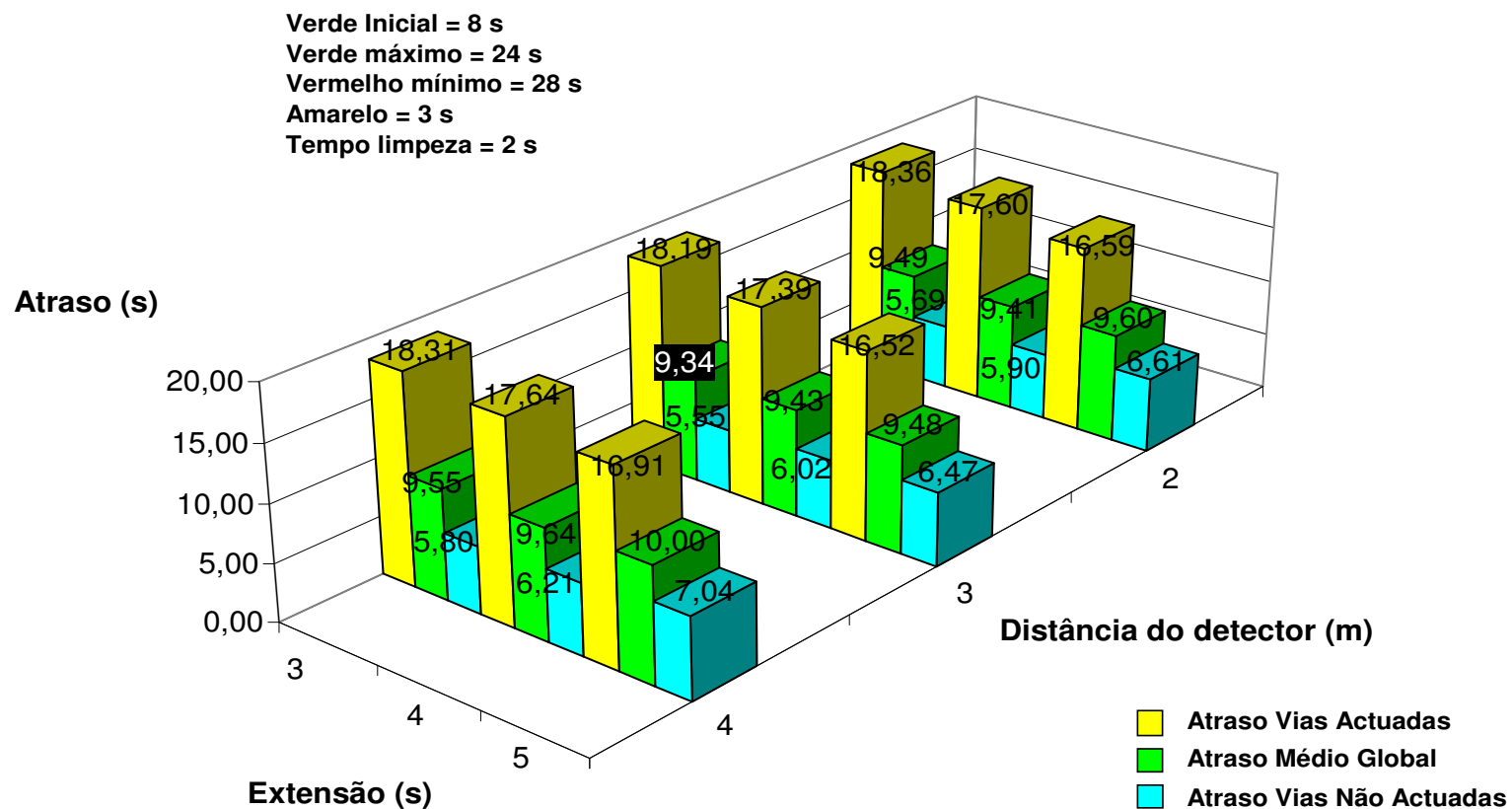


FIGURA 3.11 – GRÁFICO DE VALORES DA TABELA 3.8 QUE INCORPORA OS PARÂMETROS ÓPTIMOS PARA O ATRASO MÉDIO GLOBAL

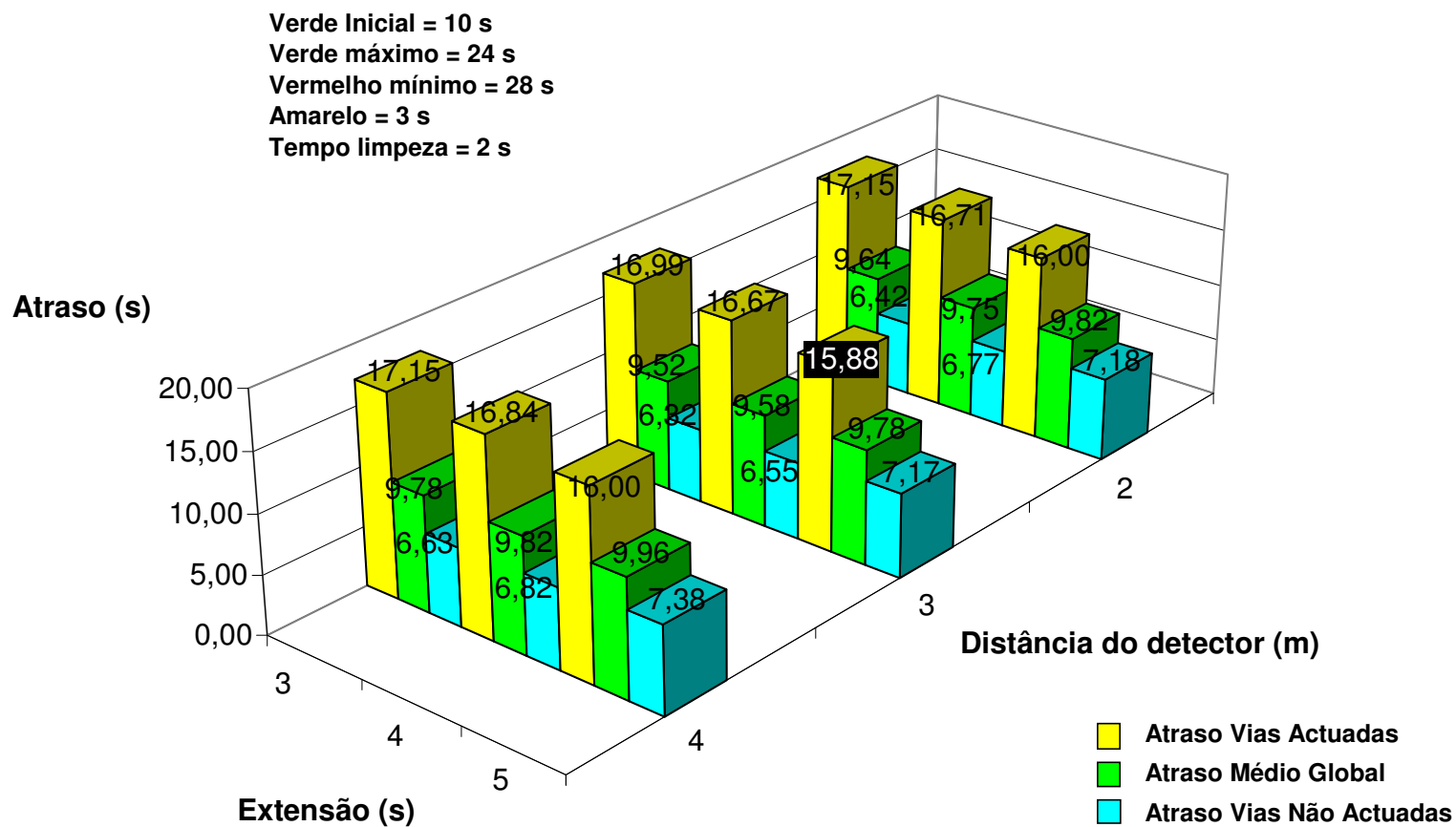


FIGURA 3.12 – GRÁFICO DE VALORES DA TABELA 3.8 QUE INCORPORA OS PARÂMETROS ÓPTIMOS PARA O ATRASO DAS VIAS ACTUADAS

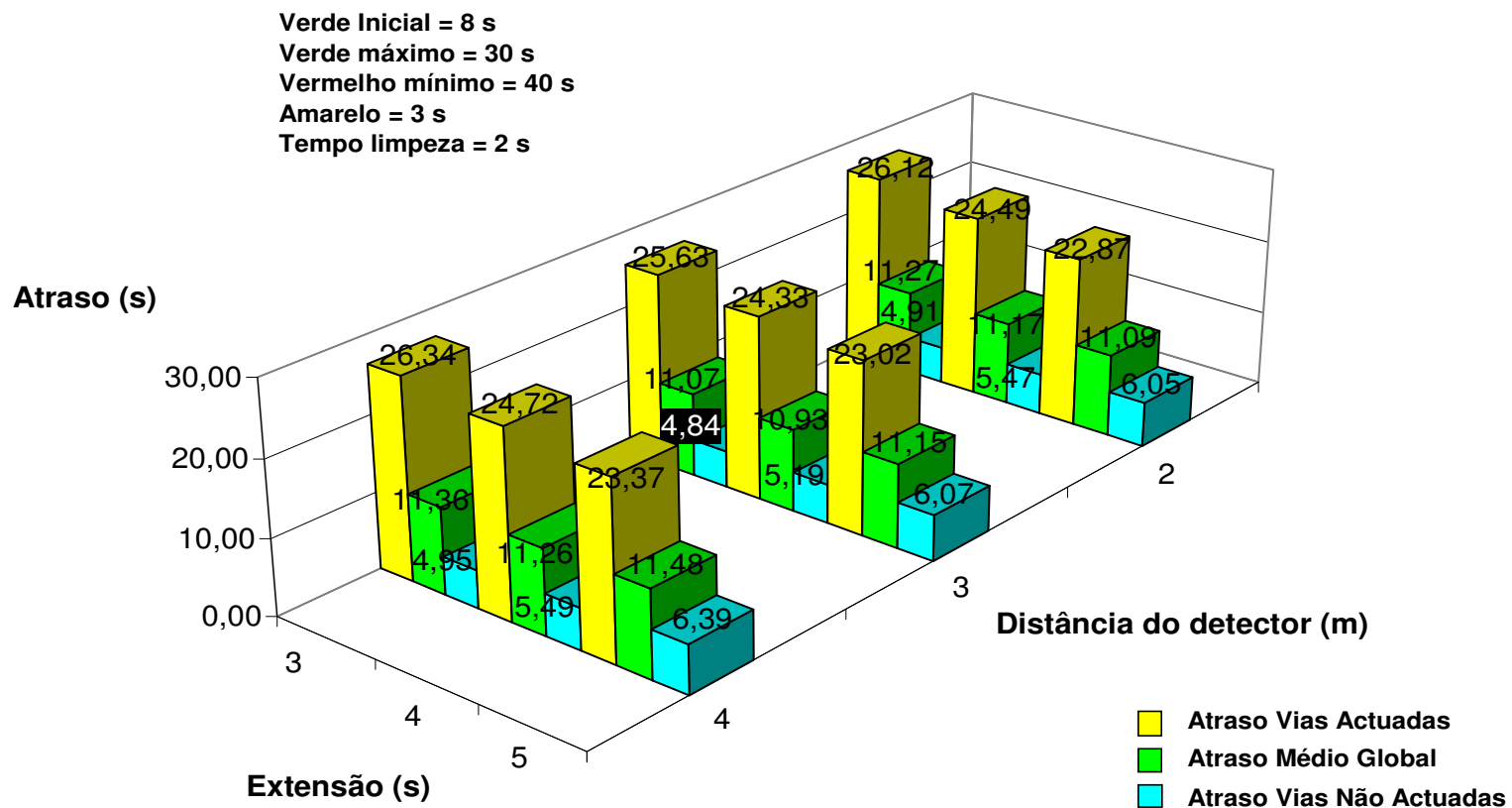


FIGURA 3.13 – GRÁFICO VALORES ÓPTIMOS PARA ATRASO VIAS NÃO ACTUADAS

3.4.3. COMPARAÇÃO COM TEMPOS E ATRASOS EM VIGOR NA INTERSECÇÃO ANALISADA

A tabela 3.10 representa as três simulações relativas aos valores óptimos obtidos em comparação com os dois planos implementados na intersecção.

A quantidade de simulações efectuadas relativas aos valores do terreno deve-se ao desconhecimento de parâmetros tais como a distância do detector à linha de paragem, o tempo de verde inicial e a extensão do tempo de verde.

De notar os valores superiores dos atrasos em relação aos obtidos no estudo em questão.

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso – Actuada (s)	Atraso – Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	24	28	3	3	18,19	5,55	9,34	8,97
3	2	10	24	28	5	3	15,88	7,17	9,78	12,59
3	2	8	30	40	3	3	25,63	4,84	11,07	9,34
3	5	8	40	48	3	3	34,13	6,49	14,78	9,87
3	5	10	40	48	3	3	32,59	7,08	14,73	11,40
3	2	10	40	48	3	3	28,91	4,94	12,13	11,24
3	5	8	40	48	4	3	31,82	7,32	14,67	11,55
3	5	10	40	48	4	3	31,03	7,60	14,62	12,72
3	5	8	40	48	5	3	30,12	8,19	14,76	13,78
3	5	10	40	48	5	3	29,37	8,41	14,69	14,64
3	2	10	40	48	5	3	26,39	5,94	12,07	14,05
3	5	8	24	64	3	3	44,33	5,77	17,33	10,26
3	5	10	24	64	3	3	41,87	6,09	16,82	11,74
3	2	10	24	64	3	3	38,65	4,36	14,64	11,60
3	5	8	24	64	4	3	40,59	6,28	16,57	12,47
3	5	10	24	64	4	3	39,46	6,65	16,49	13,55
3	5	8	24	64	5	3	38,30	7,24	16,55	14,83
3	5	10	24	64	5	3	37,67	7,36	16,45	15,56
3	2	10	24	64	5	3	34,48	5,34	14,08	15,15

TABELA 3.10 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES OBTIDOS E VALORES APLICADOS NA INTERSECÇÃO

3.4.4. DIAGRAMA DE TEMPOS ÓPTIMOS

ATRASSO MÉDIO GLOBAL = 9,34 s

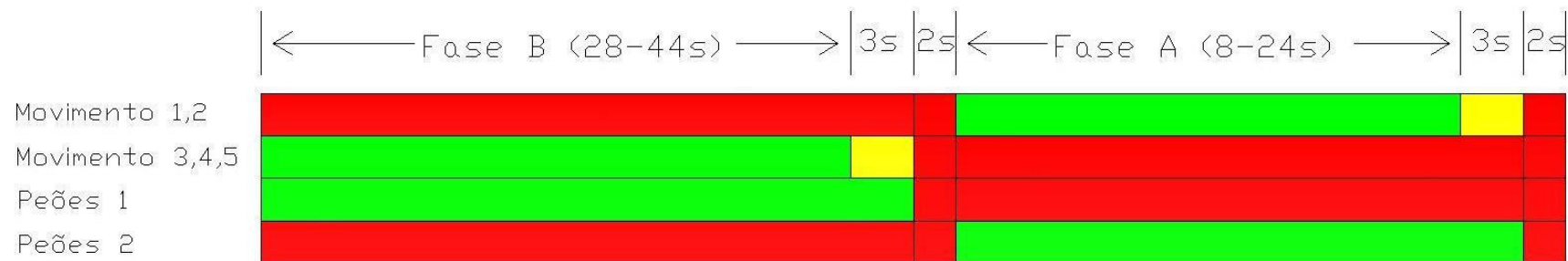


FIGURA 3.14 – DIAGRAMA DE TEMPOS ÓPTIMOS

3.4.5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

A variação dos parâmetros de dimensionamento permitiu obter uma maior sensibilização para o funcionamento de intersecções reguladas por soluções actuadas e semi-actuadas.

É possível chegar a conclusões imediatas relativas ao melhoramento da performance do cruzamento tendo em conta a alteração de variáveis, tais como a distância do detector à linha de paragem, a extensão do tempo de verde, o tempo de verde inicial, o tempo de verde máximo (parâmetros da fase secundária ou actuada) e o tempo de verde mínimo (parâmetro da fase principal ou não actuada).

A variação entre 8 e 10 segundos do tempo de verde inicial nas vias actuadas permitiu concluir que o valor maior (10 s) favorece o atraso na fase secundária ou actuada no sentido em que o torna mais baixo, isto porque permite um maior fluxo inicial, resolvendo mais facilmente possíveis perturbações e provavelmente possibilita mais facilmente uma extensão do tempo de verde.

A variação da extensão do tempo de verde entre 3 e 5 segundos, possibilita para os 5 segundos uma maior facilidade de prolongamento da duração do tempo de verde na fase actuada, ocorrendo dessa forma mais partidas e consequentemente um menor atraso.

A distância do detector à linha de paragem tem influência na detecção dos veículos e consequente na extensão do tempo de verde, mas apresenta-se como óptimo para todas as situações quando se encontra a 3 metros da linha de paragem.

Para as vias não actuadas os valores óptimos correspondem a um tempo de verde inicial de 8 segundos, um tempo de 3 segundos de extensão da fase actuada e uma distância do detector de 3 metros nas vias actuadas, valores que seguem a lógica da explicação dada anteriormente, mas com um princípio inverso.

O aumento crescente dos tempos de verde para ambas as fases favorece o atraso médio global até aos 24 segundos de tempo de verde máximo da fase secundária e de 28 segundos de verde mínimo na fase principal. Aumentando estes valores privilegia a fase não actuada.

3.5. EQUIPAMENTOS

3.5.1. SEMÁFOROS

Semáforo, é um instrumento utilizado para controlar o tráfego de veículos e peões. Utiliza uma linguagem simples e por isso de fácil assimilação.

É composto geralmente por três círculos de luzes coloridas:

- Verde – indica que o cruzamento está livre para passagem;
- Amarela – indica que a passagem está prestes a ser fechada (em geral só se usa para tráfego de veículos);
- Vermelha – indica que a passagem pelo cruzamento está impedida.

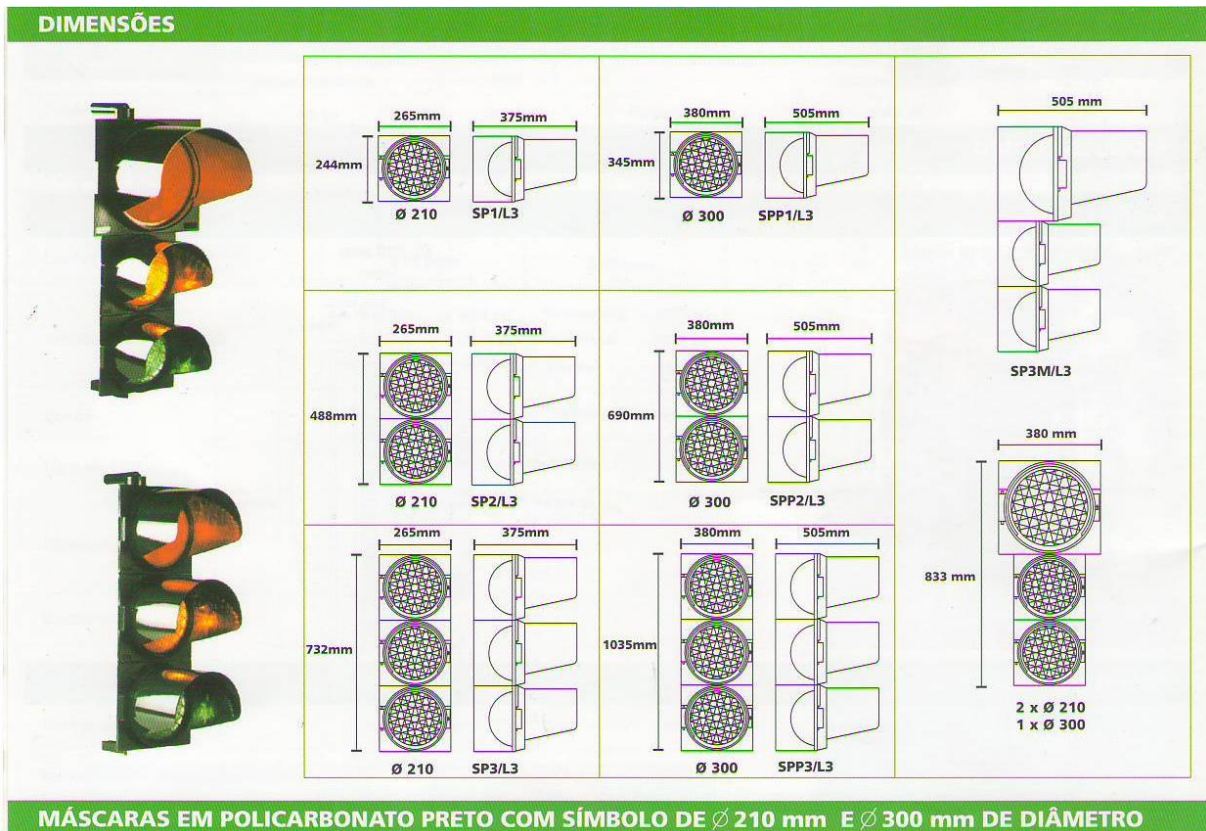



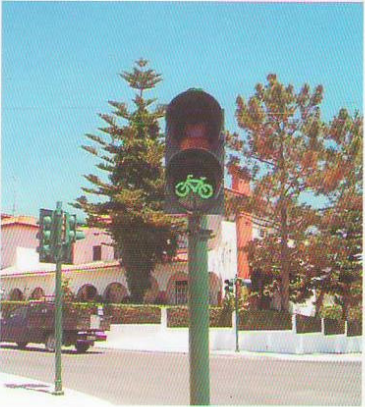
FIGURA 3.15 – DIMENSÕES DE UM SEMÁFORO TIPO

COMPARAÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Óptica de 210 mm			Óptica de 300 mm		
	Incandescente	LED		Incandescente	LED
Potência	70 W	8 W	Potência	100 W	9 W
Consumo anual	613 KW / h	70,1 KW / h	Consumo anual	876 KW / h	78,8 KW / h
Poupança energia		88 %	Poupança energia		91 %

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Lentes	210 mm	300 mm
Intensidade luminosa	Vermelho > 400 cd	Vermelho > 400 cd
	Amarelo > 200 cd	Amarelo > 400 cd
	Verde > 400 cd	Verde > 400 cd
Cores	Vermelho / Amarelo / Verde / Branco	
Tipo de LED	LUXEON HIGH FLUX	
Alimentação eléctrica	190 - 265 V 45 - 55 Hz	
	12V dc	
	24V dc	
Consumo	< 15W	
EMC	EN 50293 : class B	
Factor de Potência	> 0.9	
Temperatura de funcionamento	- 40 + 60 °C	
Humidade Relativa	< 95%	
Índice de protecção	EN 60529 : IP65	
Material da lente e módulo	Policarbonato	
Peso	< 1.0 kg	< 1.5 Kg
Dimensões	Diam. 210 X 100.2 mm	Diam. 300 x 132.4 mm

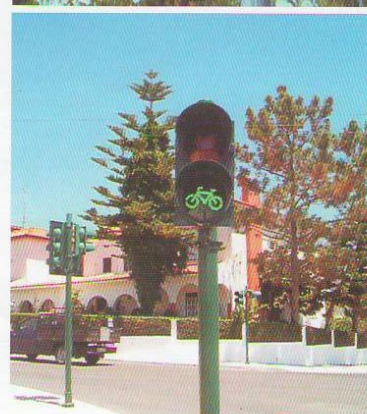


FIGURA 3.16 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UM SEMÁFORO ACTUAL

3.5.2. SENSORES

ESPIRAS:

Os problemas de controlo de tráfego originado pelos veículos a motor e a necessidade de um comando de activação de veículos foram rapidamente percebidos pelos engenheiros de planificação de trânsito.

Os primeiros sistemas de detecção por espiras apareceram em meados dos anos 50, mas provaram ser dispendiosos e em muitos casos pouco fiáveis. O primeiro caso de modelo realmente com sucesso, foi desenvolvido pela RCA da América e usava a mudança de fase principal, pela qual a espira era alimentada por um cristal oscilador para estabilidade. O sucesso deste modelo pode ser visto pelo facto de ser ainda um sucesso de produção. O maior e único problema deste sistema é a sua complexidade de sintonia (afinação) e o campo limitado do mesmo.

O detector de espiras moderno, que compete em mercados mundiais, surgiu como um aparelho extremamente estável e de confiança requerendo um mínimo, se alguma houver, de manutenção, e podendo ser usado com confiança máxima em qualquer aplicação necessária que requeira a detecção de veículos.

A detecção é obtida pela alteração da indução. Esta modificação em termos de modelo de campo magnético é causada pela distorção e absorção de um objecto de metal.

Os detectores de laços indutivos (espiras) são os dispositivos mais utilizados para monitorar os fluxos de tráfego e para controlo semafórico devido principalmente ao seu custo relativamente baixo.

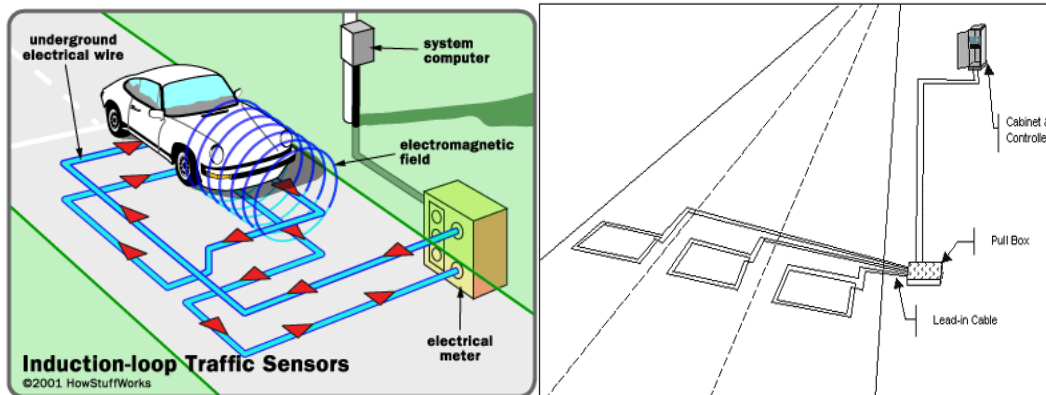


FIGURA 3.17 – ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DAS ESPIRAS MAGNÉTICAS

MICRO – ONDAS:

O radar de Micro-Ondas permite a detecção, contagem e medição da velocidade de objectos através da reflexão de ondas emitidas pelo próprio equipamento.

Permite controlar separadamente qualquer sentido de trânsito, e tem como principal vantagem a possibilidade de armazenamento de dados permitindo análises de tráfego reais.



FIGURA 3.18 – ILUSTRAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E LOCALIZAÇÃO DE UM DETECTOR MICRO-ONDAS

3.5.3. CONTROLADOR

O controlador de tráfego é um equipamento desenvolvido para o controlo de intersecções semaforicas, com capacidade de gestão.

A tecnologia aplicada, baseada numa distribuição inteligente de uma rede de microprocessadores, permite que o controlador esteja apto para qualquer tipo de aplicação, com segurança de alta performance.

Um controlador actual está estruturado para suportar:

- 12 Grupos (36 saídas)
- 44 Entradas digitais de detectores, botoneiras, etc.
- 8 Programas, seleccionáveis por controlo remoto, calendário ou localmente.

De facto o controlador é capaz de ser tanto um periférico de um sistema centralizado, como uma unidade independente capaz de executar a monitorização da sua intersecção de tráfego, com:

- Criação de arquivos Estatísticos (ex: dados de tráfego, emergência e actividades, etc).
- Envio de mensagens automáticas via GSM, GPRS, ligação linha de telefone ou outro.
- Configuração remota, com o acesso à informação diagnóstico e todos os arquivos residentes na memória.

O controlador é projectado para agir como uma unidade de controlo de tráfego para controlar as intersecções com decisões autónomas efectuadas pelas variações de fluxo de tráfego.

É também um colector de informação e permite o controlo, a monitorização e a transmissão da informação para centralização.

Assim, o controlador realiza as seguintes funções:

- Gestão de um cruzamento semaforico ou de um conjunto de cruzamentos, por meio de um algoritmo de controlo programável, que gera em tempo real os tempos de verde, de acordo com os estados de tráfego.
- Monitorização de todas as lâmpadas de semáforos, para verificar a correcta funcionalidade e de forma a assinalar uma lâmpada fundida.
- Gestão de dados de tráfego, por volume ou classe de veículos, através de sensores com espiras tradicionais ou sensores não invasivos, como infravermelhos ou microondas.
- Envio automático de mensagens de alarme, por meio de um modem GSM ou GPRS ligando um modem à linha de telefone.

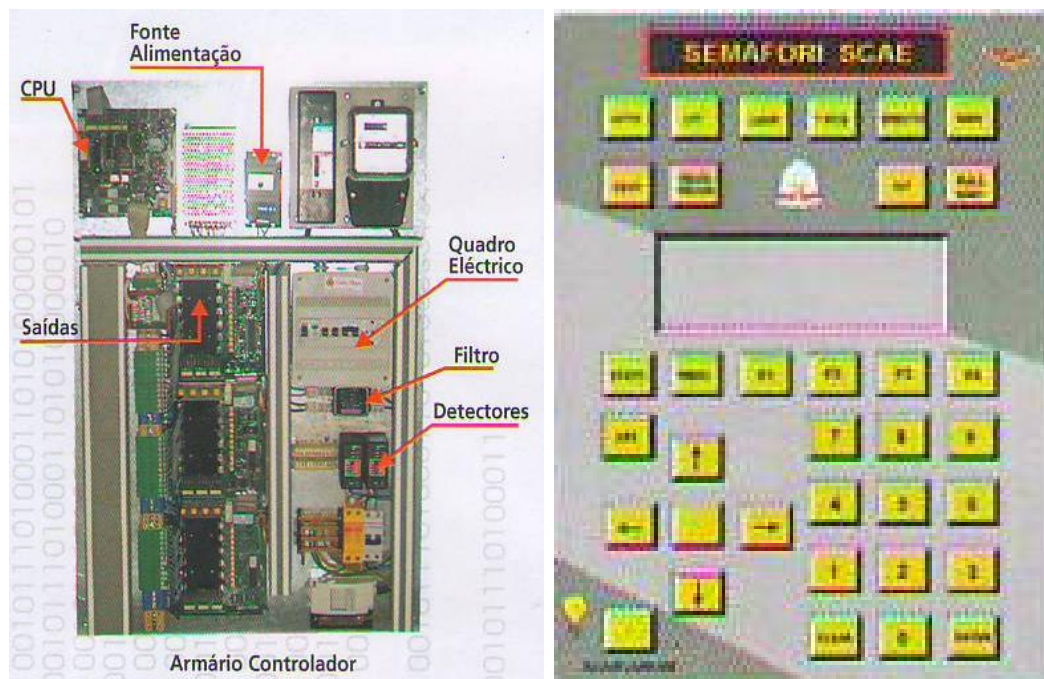


FIGURA 3.19 – ILUSTRAÇÃO DE UM CONTROLADOR E RESPECTIVO PAINEL DE CONTROLO

3.5.4. LOCALIZAÇÃO NO TERRENO

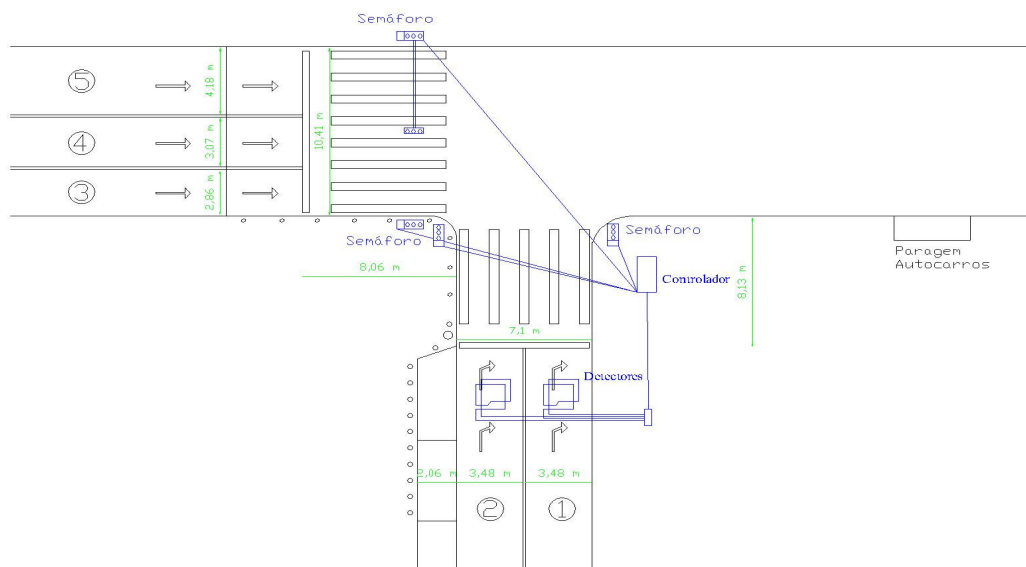


FIGURA 3.20 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA LOCALIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NO TERRENO

3.6. ESTIMATIVA ORÇAMENTAL

3.6.1. ESQUEMA ILUSTRATIVO

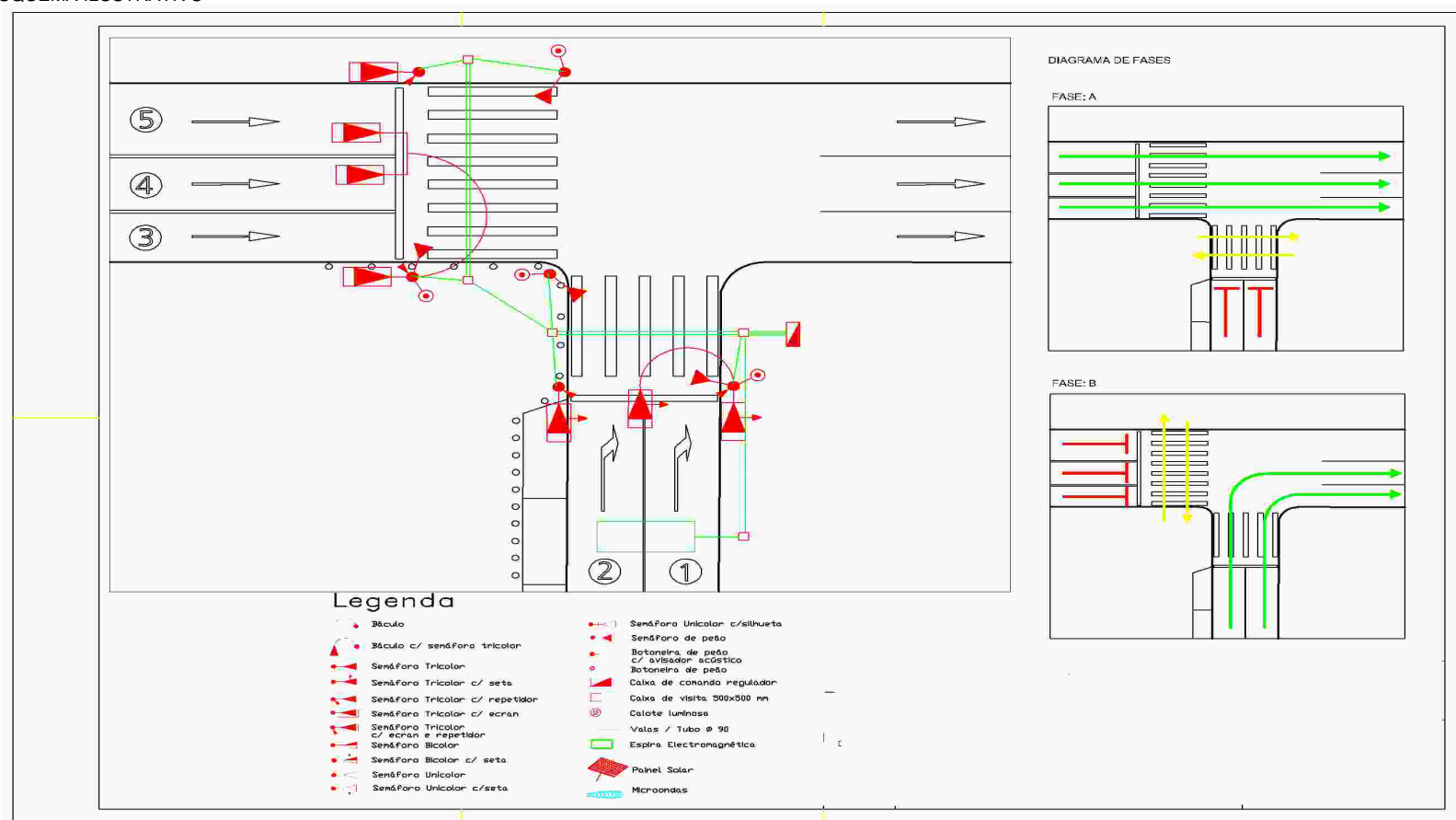


FIGURA 3.21 – ESQUEMA REPRESENTATIVO PARA BASE ORÇAMENTAL

3.6.2. ORÇAMENTO

ENTIDADE: Romeu Xavier			
DESIGNAÇÃO DA OBRA Semaforização de um Entroncamento			
DATA 30 06 2008			
DESIGNAÇÃO	QUANT.	PR. UNI.	PR. TOTAL
Semáforos 1/300 – 2/200 (tricolores) Led's	7	450,00 €	3.150,00 €
Semáforos 3/100 LED`S	4	285,00 €	1.140,00 €
Semáforos de Peão LED`S	4	330,00 €	1.320,00 €
Botoneiras	4	55,00 €	220,00 €
Avisador sonoro para invisuais	4	55,00 €	220,00 €
Ecrãs	7	50,00 €	350,00 €
Báculo	2	525,00 €	1.050,00 €
Maciços para Báculos	2	135,00 €	270,00 €
Colunas	4	125,00 €	500,00 €
Maciços para Colunas	4	45,00 €	180,00 €
Bobines de Detecção	1	100,00 €	100,00 €
Comando Regulador STC 4012	1	3.500,00 €	3.500,00 €
Maciço para Comando	1	75,00 €	75,00 €
Caixas de Visita 50 x 50	5	75,00 €	375,00 €
Eléctrodos Terra	1	20,00 €	20,00 €
Mts Tubo PVC 63	70	1,15 €	80,50 €
Mts abertura e tapamento de valas com reposição de pavimento em passeios	30	15,00 €	450,00 €
Mts abertura e tapamento de valas com reposição de pavimento em travessias	20	42,50 €	850,00 €
Mts Cabo VAV 7 x 1,5 mm (cabo tricolores + peões)	130	2,00 €	260,00 €
Mts Cabo VAV 4 x 1,5 mm (cabo Tricolores) + 15%	30	1,90 €	57,00 €
Mts Cabo VAV 3 x 1,5 mm (cabo peões) + 15%	30	1,65 €	49,50 €
Mts Cabo VAV 2 x 1,5 mm (cabo botoneiras; pré-sinalização; bobines) + 15%	50	1,40 €	70,00 €
Mts Fio Terra + 15%	50	0,80 €	40,00 €
VALOR TOTAL			14.327,00 €

TABELA 3.11 – ESTIMATIVA ORÇAMENTAL

4

CONCLUSÕES

4.1. APRECIÇÃO DO ESTUDO DESENVOLVIDO

Neste trabalho foram feitas duas demonstrações de regulação semafórica de um entroncamento, através de um processo contínuo de tratamento de dados de tráfego recolhidos no local.

Em primeiro plano foram determinados os débitos de chegada (procura por parte dos veículos) de cada uma das vias (principais e secundárias) através do relacionamento com o débito de saturação (capacidade/oferta por via). Este processo permitiu concluir a existência de uma aproximação no dimensionamento a tempos fixo, nomeadamente os tempos de verde da fase principal e secundária, bem como o valor do respectivo ciclo e dos indicadores de desempenho (capacidade da via e atraso), utilizando valores dos débitos obtidos por via teórica ou prática.

Em segundo plano, utilizando como valores base os tempos referidos anteriormente, houve oportunidade de variar todos os parâmetros de dimensionamento num programa de simulação, procurando recriar em cenário próximo da realidade de forma a obter informações sobre a ligação entre os vários intervenientes de regulação e encontrar a condição que optimiza o funcionamento da intersecção em causa.

Fixando parâmetros como o tempo de amarelo e o tempo de limpeza (tudo-vermelho) e fazendo variar o tempo de verde máximo para a fase secundária e o tempo de verde mínimo para a fase principal em função do tempo de extensão do verde da fase secundária e a distância do detector à linha de paragem concluiu-se o seguinte (utilizando como critério de referência em termos de performance o atraso relativo a cada uma das fases e o atraso médio global da intersecção como valor ponderado em função da procura a cada uma das fases):

- A distância do detector à linha de paragem para os três casos (atraso nas vias actuadas, não actuadas e atraso global) é mais favorável a 3 metros, em princípio porque será a distância limite que previne o caso de detecção do veículo e expirar o tempo de extensão por distância excessiva desde a passagem no sensor até à linha de passagem (caso o detector esteja a mais de 3 metros) e caso o detector esteja a menos de 3 metros poderá ocorrer o risco de o veículo não ser detectado por não conseguir “chegar” ao detector a tempo de estender o verde.

- Para o valor mais baixo do Atraso Médio Global é necessário um verde inicial da Fase Actuada de 8 segundos e uma extensão de 3 segundos, estes dois parâmetros privilegiam a Fase Não Actuada, como esta é mais solicitada e dado que este atraso é ponderado em função da procura, o valor mais baixo do Atraso Médio Global é conseguido com os valores anteriormente referidos.

- O mesmo princípio aplica-se para o Atraso mais baixo nas vias Não Actuadas, mas neste caso de forma directa.

- Em contrapartida, o valor mais baixo para o Atraso nas Vias Actuadas é conseguido com um valor de 10 segundos para o verde inicial (verde mínimo na fase actuada caso haja actuação) e uma extensão de 5 segundos, é claro que estes valores favorecem o prolongamento da Fase Actuada e logo uma diminuição do atraso nessa fase.

4.2. PERSPECTIVAS DE FUTURO SOBRE O TEMA

A tendência será para uma evolução na resposta às necessidades de melhoramento do tráfego em função do avanço tecnológico, na medida em que se adapta os processos de detecção e de reconhecimento de situações críticas ao funcionamento do fluxo normal, adaptando a micro-regulação a estas situações.

Também como nota ao presente trabalho, seria de esperar um desenvolvimento em programas de simulação, dadas algumas limitações dos actuais, de forma a obter uma máxima aproximação à realidade do funcionamento do tráfego, de forma a possibilitar uma regulação mais eficaz.

O controlo generalizado será uma tendência futura através de sistemas de monitorização de controladores de tráfego.

BIBLIOGRAFIA

Akcelik, R. (1981); “Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis” Australian Road Research Board Ltd” Research Report ARR 123

Costa, A. P.; Vasconcelos, A. J. (1983) “Coordenação de Sinais Luminosos ao Longo de um Itinerário”; Núcleo de Vias de Comunicação do CECUP; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Costa, A. P. (1987); “Cruzamentos Regulados por Sinais Luminosos” Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Kell, J. H.; Fullerton, I. J. (1991); “Manual of Traffic Signal Design” 2nd Edition; Institute of Transportation Engineers

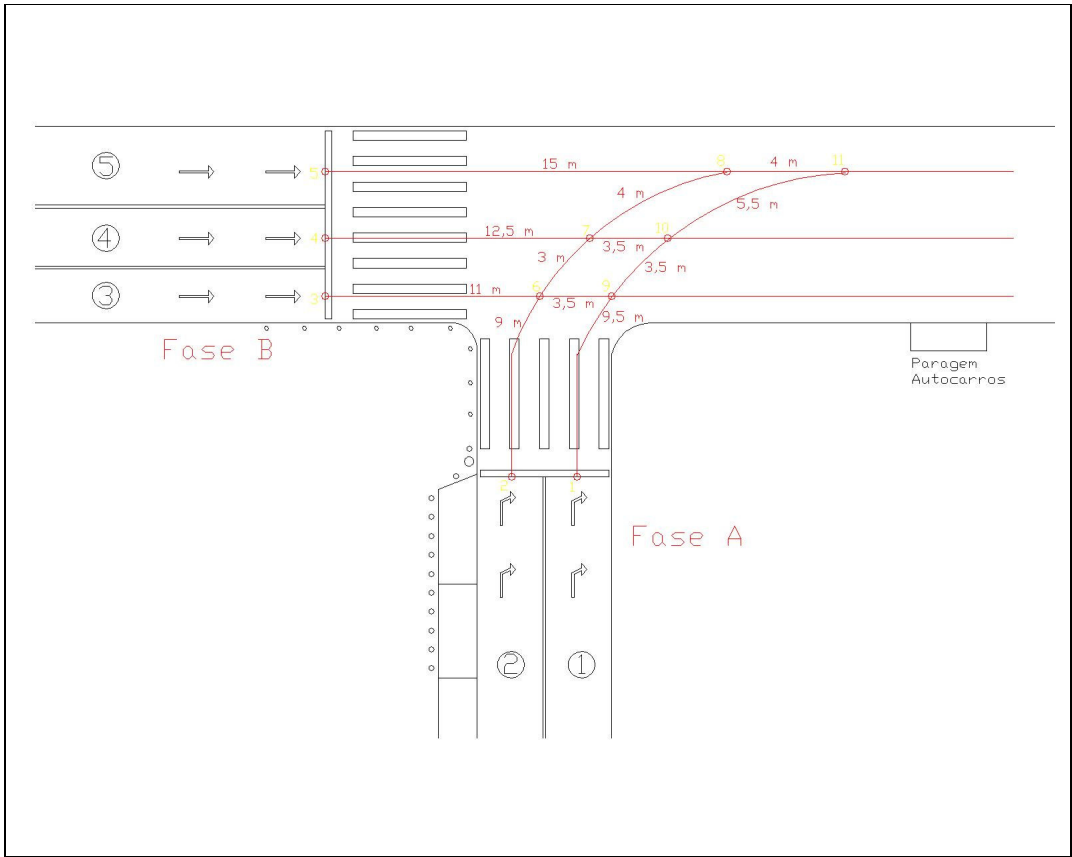
Webster, F. V. (1958); “Traffic Signal Settings”; Road Research Laboratory; Road Research Technical Paper N° 39; London

Webster, F. V.; Cobbe, B. M. (1966); “Traffic Signals”; Road Research Laboratory; Road Research Technical Paper N° 56; London

ANEXOS

A.1. TEMPO DE LIMPEZA

3.4.1. TEMPO DE LIMPEZA



PONTOS DE CONFLITO – TEMPO DE LIMPEZA

Tempo de Limpeza (veículos)	TL
dt - distância entre a barra de paragem do movimento que termina e o ponto crítico	dt
di - distância entre a barra de paragem do movimento que inicia e o ponto crítico	di
vt - velocidade do veículo / peão que inicia o movimento	vt
vl- velocidade do veículo / peão que termina o movimento	vl
dv - comprimento típico dos veículos (para o peão usa-se $dv = 0$)	dv

Transição	Termina	Inicia	Conflito	dt [m]	di [m]	vt [m]	vl [m]	dv [m]	TL [s]
A – B	1	3	9	9,5	14,5	10	10	5	0,0
A – B	2	3	6	9,0	11,0	10	10	5	0,3
A – B	1	4	10	13,0	16,0	10	10	5	0,2
A – B	2	4	7	12,0	12,5	10	10	5	0,5
A – B	1	5	11	18,5	19,0	10	10	5	0,5
A – B	2	5	8	16,0	15,0	10	10	5	0,6

CÁLCULO DO TEMPO DE LIMPEZA

Nota: Relativamente aos valores obtidos adoptou-se um tempo mínimo de limpeza de 2 segundos.

A.2. DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO

TABELAS DÉBITO SATURAÇÃO TEÓRICO

Factores de ajustamento:			
f _w - factor de ajustamento devido à largura da via	f _w =	0,9806	w = 3,12
f _i - factor de ajustamento devido ao declive da via	f _i =	1,02	i = -1
f _z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	f _z =	1	Classe A, B ou C
f _p - factor de ajustamento devido à localização da via	f _p =	0,95	
f _d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	f _d =	0,772727	p = 5,1
f _t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	f _t =	1	Tipo de veículo
			Frequência média (veíc/h)
			Veículo comercial pesado = 0
Débito de saturação teórico (veíc/h)	S =	1395	
	q ₁ =	283	veíc/h
	y ₁ =	0,203	

ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA1

Factores de ajustamento:			
f_w - factor de ajustamento devido à largura da via	$f_w =$	1,01415	$w =$ 3,55
f_i - factor de ajustamento devido ao declive da via	$f_i =$	1,02	$i =$ -1
f_z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	$f_z =$	1	Classe A, B ou C
f_p - factor de ajustamento devido à localização da via	$f_p =$	0,95	
f_d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	$f_d =$	0,8125	$p =$ 6,5
f_t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	$f_t =$	0,992469	Tipo de veículo
			Autocarro = 1,5
Débito de saturação teórico (veíc/h)	$S =$	1506	
	$q_2 =$	305	veíc/h
	$y_2 =$	0,203	

ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA2

Factores de ajustamento:			
f_w - factor de ajustamento devido à largura da via	$f_w =$	0,947	$w =$ 2,8
f_i - factor de ajustamento devido ao declive da via	$f_i =$	1,01	$i =$ -0,5
f_z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	$f_z =$	1	Classe A, B ou C
f_p - factor de ajustamento devido à localização da via	$f_p =$	0,95	
f_d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	$f_d =$	1	$p =$ 1E+20
f_t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	$f_t =$	0,955069	Tipo de veículo
			Autocarro = 27,5
Débito de saturação teórico (veíc/h)	$S =$	1649	
	$q_3 =$	671	veíc/h
	$y_3 =$	0,407	

ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA3

Factores de ajustamento:			
f _w - factor de ajustamento devido à largura da via	f _w =	0,947	w = 2,8
f _i - factor de ajustamento devido ao declive da via	f _i =	1,01	i = -0,5
f _z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	f _z =	1	Classe A, B ou C
f _p - factor de ajustamento devido à localização da via	f _p =	1	
f _d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	f _d =	1	p = 1E+20
f _t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	f _t =	0,98163	Tipo de veículo
			Autocarro = 5
Débito de saturação teórico (veíc/h)	S =	1784	
		q ₄ =	726 veíc/h
		y ₄ =	0,407

ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA4

Factores de ajustamento:			
f_w - factor de ajustamento devido à largura da via	$f_w =$	0,947	$w =$ 2,8
f_i - factor de ajustamento devido ao declive da via	$f_i =$	1,01	$i =$ -0,5
f_z - factor de ajustamento devido à localização do cruzamento	$f_z =$	1	Classe A, B ou C
f_p - factor de ajustamento devido à localização da via	$f_p =$	0,95	
f_d - factor de ajustamento devido à mudança de direcção	$f_d =$	1	$p =$ 1E+20
f_t - factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego	$f_t =$	0,985309	Tipo de veículo
			Autocarro = 9
Débito de saturação teórico (veíc/h)	$S =$	1701	
	$q_5 =$	692	veíc/h
	$y_5 =$	0,407	

ESTIMAÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO TEÓRICO VIA5

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

A.3. DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	1	-	12	22
2	4	1	-	13	24
3	3	-	-	-	18
4	2	-	-	-	24
5	3	-	-	-	24
6	3	1	-	12	24
7	3	2	-	14	16
8	3	-	-	-	16
9	2	-	-	-	18
10	1	-	-	-	22
11	2	-	-	-	15
12	2	-	-	-	24
13	3	1	-	14	20
14	2	-	-	-	17
15	2	-	-	-	22
16	2	-	-	-	24
17	3	-	-	-	24
18	4	1	-	12	24
19	2	-	-	-	18
20	3	1	-	13	21
21	1	-	-	-	24
22	4	-	-	-	18
23	2	-	-	-	15
24	3	1	-	13	22
25	1	-	-	-	20
26	4	1	-	13	24
27	4	-	-	-	19
28	4	-	-	-	21
29	2	-	-	-	18
30	3	1	-	12	24
Total	81	11	0	128	622
Amostra	30	10	0	10	

S1 =	1414	veíc/h
q1 =	281	veíc/h
y1 =	0,199	

MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 1

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	1	-	14	24
2	4	1	1	12	12
3	3	4	-	18	24
4	4	6	1	23	23
5	4	2	-	15	17
6	4	7	3	24	24
7	4	2	1	14	14
8	4	5	2	21	21
9	4	7	1	24	24
10	4	6	-	24	24
11	4	7	1	23	23
12	4	1	-	15	18
13	4	6	1	24	24
14	4	5	2	24	24
15	3	7	2	24	24
16	4	6	1	24	24
17	4	2	1	16	16
18	4	1	-	14	16
19	4	2	-	15	18
20	5	3	-	19	22
21	3	1	-	12	15
22	4	1	-	12	15
23	4	5	-	21	24
24	3	2	-	15	18
25	3	5	-	21	24
26	4	3	-	19	22
27	4	4	1	24	24
28	4	6	2	24	24
29	4	7	2	24	24
30	3	4	-	19	22
Total	115	119	22	578	628
Amostra	30	30	15	30	

S2 =	1541 veíc/h
q2 =	307 veíc/h
y2 =	0,199

MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 2

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	2	1	-	12	64
2	2	1	-	13	64
3	3	1	-	13	64
4	3	1	-	12	64
5	2	2	-	15	64
6	2	1	-	13	64
7	2	1	-	12	64
8	2	2	-	14	64
9	3	1	-	12	64
10	1	2	-	14	64
11	2	3	-	17	64
12	3	2	-	14	64
13	3	2	-	13	64
14	3	3	-	16	64
15	2	2	-	14	64
16	2	3	-	16	64
17	4	2	-	15	64
18	3	1	-	12	64
19	3	1	-	13	64
20	2	2	-	15	64
21	4	2	-	14	64
22	4	1	-	13	64
23	2	3	-	18	64
24	3	2	-	14	64
25	3	2	-	15	64
26	3	1	-	12	64
27	4	1	-	13	64
28	3	3	-	17	64
29	2	4	-	18	64
30	3	2	-	15	64
Total	80	55	0	424	1920
Amostra	30	30	0	30	

S₃ =	1597 veíc/h
Q₃ =	658 veíc/h
y₃ =	0,412

MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 3

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	2	-	14	64
2	5	8	-	27	64
3	5	5	-	19	64
4	3	4	-	17	64
5	2	5	-	20	64
6	5	4	-	19	64
7	3	4	-	20	64
8	4	7	-	23	64
9	4	3	-	18	64
10	3	5	-	21	64
11	4	7	-	23	64
12	3	6	-	21	64
13	3	4	-	19	64
14	4	4	-	17	64
15	3	8	-	28	64
16	3	6	-	21	64
17	4	4	-	19	64
18	4	3	-	18	64
19	4	5	-	20	64
20	5	3	-	17	64
21	3	6	-	22	64
22	4	6	-	21	64
23	3	2	-	15	64
24	3	5	-	19	64
25	5	6	-	23	64
26	4	3	-	16	64
27	3	4	-	19	64
28	4	3	-	17	64
29	4	5	-	21	64
30	4	6	-	24	64
Total	112	143	0	598	1920
Amostra	30	30	0	30	

S4 = 1728 veíc/h

q4 = 712 veíc/h

y4 = 0,412

MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 4

Nº Ciclo	Partidas da fila (veíc)			Tempo de saturação (seg)	Tempo de verde (seg)
	Período inicial	Período intermédio	Período final		
1	4	2	-	15	64
2	5	7	-	23	64
3	4	7	-	24	64
4	4	3	-	18	64
5	4	6	-	23	64
6	4	5	-	21	64
7	5	10	-	28	64
8	5	8	-	27	64
9	3	8	-	25	64
10	5	6	-	22	64
11	3	6	-	21	64
12	4	5	-	20	64
13	4	6	-	24	64
14	5	7	-	25	64
15	4	3	-	18	64
16	3	8	-	26	64
17	4	7	-	25	64
18	4	6	-	24	64
19	4	5	-	21	64
20	4	9	-	27	64
21	5	2	-	15	64
22	3	6	-	22	64
23	4	5	-	19	64
24	3	8	-	27	64
25	3	5	-	20	64
26	3	7	-	23	64
27	4	3	-	16	64
28	4	6	-	23	64
29	4	5	-	21	64
30	4	4	-	19	64
Total	119	175	0	662	1920
Amostra	30	30	0	30	

S5 =	1740 veíc/h
q5 =	717 veíc/h
y5 =	0,412

MEDIÇÃO DO DÉBITO DE SATURAÇÃO PRÁTICO VIA 5

A.4. SIMULAÇÕES

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	14	28	3	2	18,34	5,62	9,43	8,94
3	2	10	14	28	3	2	17,15	6,47	9,67	10,76
3	2	8	14	28	4	2	17,79	5,95	9,50	9,74
3	2	10	14	28	4	2	16,65	6,60	9,61	11,35
3	2	8	14	28	5	2	17,20	6,36	9,61	10,41
3	2	10	14	28	5	2	16,30	6,86	9,69	11,74
3	2	8	14	28	3	3	18,31	5,62	9,42	9,00
3	2	10	14	28	3	3	17,12	6,14	9,43	10,75
3	2	8	14	28	4	3	17,61	5,84	9,37	9,71
3	2	10	14	28	4	3	16,78	6,68	9,71	11,21
3	2	8	14	28	5	3	16,90	6,23	9,43	10,38
3	2	10	14	28	5	3	16,49	6,71	9,64	11,69
3	2	8	14	28	3	4	18,52	5,76	9,59	9,00
3	2	10	14	28	3	4	17,39	6,45	9,73	10,81
3	2	8	14	28	4	4	18,02	6,06	9,65	9,68
3	2	10	14	28	4	4	17,11	6,83	9,91	11,26
3	2	8	14	28	5	4	17,31	6,44	9,70	10,40
3	2	10	14	28	5	4	16,64	7,12	9,97	11,74

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	19	28	3	2	18,48	5,72	9,55	8,98
3	2	10	19	28	3	2	17,09	6,39	9,60	10,83
3	2	8	19	28	4	2	17,60	6,11	9,55	9,85
3	2	10	19	28	4	2	16,75	6,70	9,71	11,54
3	2	8	19	28	5	2	16,84	6,45	9,56	10,84
3	2	10	19	28	5	2	16,15	7,06	9,79	12,43
3	2	8	19	28	3	3	18,19	5,62	9,39	9,00
3	2	10	19	28	3	3	17,01	6,29	9,50	10,82
3	2	8	19	28	4	3	17,56	5,95	9,43	9,82
3	2	10	19	28	4	3	16,43	6,47	9,46	11,48
3	2	8	19	28	5	3	16,65	6,42	9,49	10,91
3	2	10	19	28	5	3	15,94	6,98	9,67	12,40
3	2	8	19	28	3	4	18,31	5,80	9,55	8,96
3	2	10	19	28	3	4	17,31	6,63	9,83	10,83
3	2	8	19	28	4	4	17,87	6,31	9,78	9,90
3	2	10	19	28	4	4	16,46	6,98	9,82	11,56
3	2	8	19	28	5	4	16,82	6,78	9,79	11,04
3	2	10	19	28	5	4	16,19	7,35	10,00	12,42

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	24	28	3	2	18,36	5,69	9,49	8,97
3	2	10	24	28	3	2	17,15	6,42	9,64	10,87
3	2	8	24	28	4	2	17,60	5,90	9,41	9,85
3	2	10	24	28	4	2	16,71	6,77	9,75	11,61
3	2	8	24	28	5	2	16,59	6,61	9,60	11,14
3	2	10	24	28	5	2	16,00	7,18	9,82	12,50
3	2	8	24	28	3	3	18,19	5,55	9,34	8,97
3	2	10	24	28	3	3	16,99	6,32	9,52	10,84
3	2	8	24	28	4	3	17,39	6,02	9,43	9,87
3	2	10	24	28	4	3	16,67	6,55	9,58	11,48
3	2	8	24	28	5	3	16,52	6,47	9,48	11,00
3	2	10	24	28	5	3	15,88	7,17	9,78	12,59
3	2	8	24	28	3	4	18,31	5,80	9,55	8,96
3	2	10	24	28	3	4	17,15	6,63	9,78	10,87
3	2	8	24	28	4	4	17,64	6,21	9,64	9,92
3	2	10	24	28	4	4	16,84	6,82	9,82	11,59
3	2	8	24	28	5	4	16,91	7,04	10,00	11,17
3	2	10	24	28	5	4	16,00	7,38	9,96	12,58

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	24	34	3	2	21,64	5,32	10,21	9,15
3	2	10	24	34	3	2	20,77	5,95	10,39	10,93
3	2	8	24	34	4	2	20,98	5,72	10,30	10,12
3	2	10	24	34	4	2	19,91	6,27	10,36	11,80
3	2	8	24	34	5	2	20,04	6,31	10,43	11,45
3	2	10	24	34	5	2	18,96	6,83	10,47	13,01
3	2	8	24	34	3	3	21,77	5,26	10,21	9,15
3	2	10	24	34	3	3	20,48	5,81	10,21	10,98
3	2	8	24	34	4	3	21,00	5,72	10,30	10,31
3	2	10	24	34	4	3	19,78	6,23	10,29	11,82
3	2	8	24	34	5	3	19,82	6,37	10,40	11,59
3	2	10	24	34	5	3	18,91	6,77	10,41	13,05
3	2	8	24	34	3	4	22,35	5,34	10,44	9,12
3	2	10	24	34	3	4	20,92	5,93	10,42	10,96
3	2	8	24	34	4	4	21,11	6,01	10,54	10,29
3	2	10	24	34	4	4	20,01	6,42	10,49	11,84
3	2	8	24	34	5	4	20,00	6,47	10,53	11,53
3	2	10	24	34	5	4	19,36	7,02	10,72	13,09

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

Amarelo (s)	T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
3	2	8	30	40	3	2	26,12	4,91	11,27	9,33
3	2	10	30	40	3	2	24,34	5,46	11,12	10,98
3	2	8	30	40	4	2	24,49	5,47	11,17	10,64
3	2	10	30	40	4	2	23,15	5,85	11,04	12,04
3	2	8	30	40	5	2	22,87	6,05	11,09	12,32
3	2	10	30	40	5	2	22,28	6,58	11,29	13,46
3	2	8	30	40	3	3	25,63	4,84	11,07	9,34
3	2	10	30	40	3	3	24,27	5,37	11,04	11,10
3	2	8	30	40	4	3	24,33	5,19	10,93	10,59
3	2	10	30	40	4	3	23,46	5,74	11,05	12,06
3	2	8	30	40	5	3	23,02	6,07	11,15	12,35
3	2	10	30	40	5	3	22,05	6,42	11,11	13,60
3	2	8	30	40	3	4	26,34	4,95	11,36	9,36
3	2	10	30	40	3	4	24,57	5,75	11,39	11,08
3	2	8	30	40	4	4	24,72	5,49	11,26	10,66
3	2	10	30	40	4	4	23,51	6,02	11,26	12,20
3	2	8	30	40	5	4	23,37	6,39	11,48	12,47
3	2	10	30	40	5	4	22,43	6,73	11,44	13,52

Intersecções reguladas por sinais luminosos de comando actuado e semi-actuado

T. Limpeza (s)	Verde inicial (s)	Verde máximo (s)	Vermelho mínimo (s)	Extensão (s)	Distância do detector (m)	Atraso - Actuada (s)	Atraso - Não Actuada (s)	Atraso Médio (s)	T. verde médio - Actuada (s)
5	8	40	48	3	3	34,13	6,49	14,78	9,87
5	10	40	48	3	3	32,59	7,08	14,73	11,40
2	10	40	48	3	3	28,91	4,94	12,13	11,24
5	8	40	48	4	3	31,82	7,32	14,67	11,55
5	10	40	48	4	3	31,03	7,60	14,62	12,72
5	8	40	48	5	3	30,12	8,19	14,76	13,78
5	10	40	48	5	3	29,37	8,41	14,69	14,64
2	10	40	48	5	3	26,39	5,94	12,07	14,05
5	8	24	64	3	3	44,33	5,77	17,33	10,26
5	10	24	64	3	3	41,87	6,09	16,82	11,74
2	10	24	64	3	3	38,65	4,36	14,64	11,60
5	8	24	64	4	3	40,59	6,28	16,57	12,47
5	10	24	64	4	3	39,46	6,65	16,49	13,55
5	8	24	64	5	3	38,30	7,24	16,55	14,83
5	10	24	64	5	3	37,67	7,36	16,45	15,56
2	10	24	64	5	3	34,48	5,34	14,08	15,15

VALORES DAS VARIÁVEIS DOS PLANOS ACTUAIS DO CRUZAMENTO

A.5. GRÁFICOS RESUMO DAS SIMULAÇÕES

GRÁFICOS DAS SIMULAÇÕES:

